



Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung  
Federal Bureau of Maritime Casualty Investigation

## **Untersuchungsbericht 236/20**

### **Schwerer Seeunfall**

#### **Brand im Spülluftkanal der Hauptmaschine an Bord der EBBA MAERSK am 29. Juli 2020**

25. Mai 2023

Die Untersuchung wurde in Übereinstimmung mit dem Gesetz zur Verbesserung der Sicherheit der Seefahrt durch die Untersuchung von Seeunfällen und anderen Vorkommnissen (Seesicherheits-Untersuchungs-Gesetz, SUG) durchgeführt. Danach ist das alleinige Ziel der Untersuchung die Verhütung künftiger Unfälle. Die Untersuchung dient nicht der Feststellung des Verschuldens, der Haftung oder von Ansprüchen (§ 9 Abs. 2 SUG).

Der vorliegende Bericht soll nicht in Gerichtsverfahren oder Verfahren der seeamtlichen Untersuchung verwendet werden. Auf § 34 Abs. 4 SUG wird hingewiesen.

Bei der Auslegung des Untersuchungsberichtes ist die deutsche Fassung maßgebend.

Herausgeber:  
Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung  
Bernhard-Nocht-Str. 78  
20359 Hamburg



Direktor: Ulf Kaspera  
Tel.: +49 40 3190 8300  
posteingang-bsu@bsh.de

Fax.: +49 40 3190 8340  
www.bsu-bund.de

## Änderungsverzeichnis

Seite	Änderung	Datum

## Inhaltsverzeichnis

1	ZUSAMMENFASSUNG .....	9
2	FAKTEN .....	10
2.1	Schiffsfoto .....	10
2.2	Schiffsdaten .....	10
2.3	Reisedaten.....	11
2.4	Angaben zum Seeunfall.....	11
2.5	Einschaltung der Behörden an Land und Notfallmaßnahmen.....	12
3	UNFALLHERGANG UND UNTERSUCHUNG .....	13
3.1	Unfallhergang .....	13
3.1.1	Unfall .....	13
3.1.2	Weiterer Verlauf.....	16
3.1.3	Schadensbild .....	16
3.1.4	Wärtsilä Service Report.....	19
3.1.5	Aufzeichnungen .....	20
3.1.5.1	Track .....	20
3.1.5.2	Alarmschreiber .....	22
3.2	Untersuchung .....	22
3.2.1	Hintergrund: Begrenzung von Schwefel in Schiffsabgasen .....	23
3.2.1.1	MARPOL Anlage VI.....	23
3.2.1.2	Schwefelemissionen durch Schiffsabgase .....	24
3.2.1.3	Umsetzung der Schwefel-Emissionsvorgaben .....	25
3.2.2	Hintergrund: Schiffskraftstoffe .....	27
3.2.2.1	Allgemeines.....	27
3.2.2.2	Mischproblematik .....	29
3.2.2.3	Kraftstoffumstellung im Schiffsbetrieb .....	32
3.2.2.4	Schwefelarme Schweröle .....	33
3.2.2.5	Schmierölkompatibilität .....	37
3.2.3	Containerschiff EBBA MAERSK .....	38
3.2.4	Hauptmotor Wärtsilä 14RT-flex96C.....	39
3.2.4.1	Der Motor .....	39
3.2.4.2	RT-flex Common-Rail-Einspritzsteuerung .....	39
3.2.4.3	Einspritzregelungseinheit ICU .....	41
3.2.4.4	Leckströme in der ICU.....	48
3.2.4.5	Wärtsilä Technical Bulletins.....	50
3.2.5	Weitere Untersuchungen .....	52
3.2.5.1	Kraftstoffumstellvorgang.....	52
3.2.5.2	Condition Based Maintenance .....	53
3.2.5.3	Laboranalysen.....	54
3.2.5.4	Bachelorarbeit .....	60
3.2.5.5	Austausch mit WinGD .....	62

4	AUSWERTUNG .....	63
4.1	Krisenmanagement / Umgang mit dem Unfall .....	63
4.1.1	Generelle Bewertung .....	63
4.1.2	Maersk-Verfahrensanweisungen: Feuer im Spülluftkanal .....	64
4.2	Kompatibilität der Kraftstoffe .....	64
4.3	ICUs .....	66
4.3.1	Laboranalysen .....	66
4.3.2	Auswertung .....	66
5	SCHLUSSFOLGERUNGEN .....	69
5.1	Kraftstoffunverträglichkeit beim Umstellvorgang .....	69
5.2	Fehlfunktion der betroffenen ICUs .....	69
6	BEREITS DURCHGEFÜHRTE MAßNAHMEN .....	70
7	SICHERHEITSEMPFEHLUNG .....	71
7.1	Maersk Line .....	71
7.2	WinGD .....	71
8	QUELLEN .....	72

### **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1:	Die EBBA MAERSK beim Anlaufen von Hamburg .....	10
Abbildung 2:	Unfallort und Notankerplätze .....	12
Abbildung 3:	Verlauf einzelner Abgastemperaturen und Hauptmaschinendrehzahl .	15
Abbildung 4:	Zwischenboden mit Stopfbuchse eines betroffenen Zylinders .....	17
Abbildung 5:	Von hohen Temperaturen verfärbter Anstrich der Hauptmaschine .....	17
Abbildung 6:	Ausgebaute und zerlegte ICU .....	18
Abbildung 7:	Mit teerartiger Substanz verstopfte „neutrale Räume“ einer ICU .....	18
Abbildung 8:	Track der EBBA MAERSK, Unfall, Notankerplätze, Probefahrt .....	20
Abbildung 9:	Track der EBBA MAERSK, Detail mit Zeitstempeln (UTC) .....	21
Abbildung 10:	IMO-Schwefelgrenzwerte .....	24
Abbildung 11:	vereinfachte Visualisierungen der verschiedenen Scrubber-Arten ....	26
Abbildung 12:	Aufbau verschiedenster Erdölmoleküle (Veranschaulichung) .....	28
Abbildung 13:	Ölschlamm in Separatoren und Filtern nach Kraftstoffmischung .....	30
Abbildung 14:	Fünfstufige Bewertung eines Tüpfeltests nach ASTM D4740 .....	31
Abbildung 15:	Mit erstarrtem Wachs dichtgesetzter Filter .....	36
Abbildung 16:	Hyundai Wärtsilä 14RT-flex96C (Lizenzbau) beim Testlauf .....	39

Abbildung 17: Schematische Darstellung des Common-Rail-Prinzips.....	41
Abbildung 18: ICU vor Zylinderkopf, Einspritzleitungen .....	42
Abbildung 19: 3D-Darstellung einer ICU.....	43
Abbildung 20: Foto einer ICU .....	44
Abbildung 21: Wirkprinzip ICU: Ruhezustand.....	44
Abbildung 22: Wirkprinzip ICU: Magnetventil wird vom WECS aktiviert .....	45
Abbildung 23: Wirkprinzip ICU: Steueröl aktiviert Mengenkolben.....	45
Abbildung 24: Wirkprinzip ICU: Kraftstoff wird eingespritzt.....	46
Abbildung 25: Wirkprinzip ICU: Magnetventil geht in die Ausgangsposition.....	46
Abbildung 26: Wirkprinzip ICU: Mengenkolben füllt sich wieder .....	47
Abbildung 27: Wirkprinzip ICU: Ruhezustand.....	47
Abbildung 28: Leckströme innerhalb der ICU – Schnittzeichnung .....	49
Abbildung 29: Leckströme innerhalb der ICU – Hydraulikschaubild .....	50
Abbildung 30: Verschleißspuren (z. B. Rillen) an Ventilsitz und -schieber .....	51
Abbildung 31: Kalkulationstabelle der EBBA MAERSK für Kraftstoffumstellung .....	53
Abbildung 32: Tüpfeltest des vor der Umstellung verwendeten HFO .....	56
Abbildung 33: Tüpfeltest der beiden an der Umstellung beteiligten Kraftstoffe .....	57
Abbildung 34: Teerartiger Rückstand .....	58
Abbildung 35: ATR-Spektrum der teerartigen Ablagerung .....	59
Abbildung 36: ATR-Spektrum des nachgelieferten Schmieröls .....	60
Abbildung 37: Grafik: Schadensanalyse nach VDI 3822 .....	61

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Fünfstufige Bewertung eines Tüpfeltests nach ASTM D4740.....	32
Tabelle 2: Zusammensetzung klassischer und schwefelarmer Schweröle .....	35
Tabelle 3: Ergebnisse der XRF-Messungen .....	59

## Abkürzungsverzeichnis

A/S	Aktieselskab (dänisch: Aktiengesellschaft)
ABS	American Bureau of Shipping (Klassifikationsgesellschaft)
APMM	A. P. Møller-Mærsk
ASTM	American Society for Testing and Materials (Standardisierungsgesellschaft)
ATR	Attenuated Total Reflection, (abgeschwächte Totalreflexion), eine Methode der Infrarotspektroskopie
BG Verkehr	Berufsgenossenschaft Verkehrswirtschaft Post-Logistik Telekommunikation.
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
CBM	Condition Based Maintenance (zustandsbezogene Instandhaltung)
CIMAC	Conseil International des Machines à Combustion
Class NK	japanische Klassifikationsgesellschaft Nippon Kaiji Kyokai
CSSC	China State Shipbuilding Corporation
DIN	Deutsches Institut für Normung
DM	Distillate Marine (Destillatkraftstoff, muss nicht beheizt gelagert werden)
DNV	Det Norske Veritas (Klassifikationsgesellschaft)
DNV GL	Det Norske Veritas Germanischer Lloyd (Klassifikationsgesellschaft)
ECA	Emission Control Area (Seegebiet mit Emissionsbeschränkungen)
EGCSA	Exhaust Gas Cleaning Systems Association (Fachverband für Entwickler und Hersteller von Abgasreinigungssystemen)
FAME	fatty acid methyl ester (Fettsäuremethylester FSME)
HFO	Heavy Fuel Oil (Schweröl)
ICU	Injection Control Unit (Elektronische Einspritzregelungseinheit)
ICV	Injection Control Valve (Einspritzsteuerventil)
IMO	International Maritime Organisation
ISM	International Safety Management
ISO	International Organisation for Standardisation
LNG	Liquefied Natural Gas (verflüssigtes Erdgas)
LONO	Letter of no objection
LSMGO	Low-Sulphur Marine Gas Oil (Marinegasöl mit sehr geringem Schwefelgehalt)
MARPOL	International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (Internationales Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe; „marine pollution“)

MCR	Micro Carbon Residue (mikroskopische Kohlenstoff-Rückstände)
MDO	Marine Diesel Oil („Marine Diesel“)
MEPC	Marine Environment Protection Committee
MESZ	mitteleuropäische Sommerzeit
MGO	Marine Gas Oil („Gasöl“)
MW	Megawatt
NO <sub>x</sub>	Sammelbezeichnung für Sauerstoffverbindungen mit Stickstoff (Stickoxide); für Verbrennungsmotoren relevant sind NO und NO <sub>2</sub>
pH-Wert	potentia hydrogenii, lat. „Potential des Wasserstoffs“
RM	Residual Marine (Rückstandskraftstoff, muss beheizt gelagert werden)
SECA	Sulphur Emission Control Area oder SO <sub>x</sub> Emission Control Area (Seegebiet mit Emissionsbeschränkungen für Schwefel(oxide))
SO <sub>x</sub>	Sammelbezeichnung für Sauerstoffverbindungen mit Schwefel (Schwefeloxide); für Verbrennungsmotoren relevant sind SO, SO <sub>2</sub> und SO <sub>3</sub>
TBN	Total Base Number (Basenzahl, Maß für die Basizität bzw. Säureneutralisations-Reserve eines Zylinderschmieröls)
TBO	Time between overhauls (Anzahl der Betriebsstunden zwischen zwei Wartungsvorgängen)
TEU	Twenty-Foot Equivalent Unit
THB	Täglicher Hafenbericht (deutsche maritime Tageszeitung)
TUHH	Techische Universität Hamburg
ULCS/ULCV	Ultra-Large Container Ship/Vessel (Großcontainerschiff)
ULSFO	Ultra-Low Sulphur Heavy Fuel Oil (Schweröl mit sehr geringem Schwefelgehalt)
USGS	U. S. Geological Survey
UTC	Coordinated Universal Time (koordinierte Weltzeit; Zeit am Nullmeridian)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VKZ	Verkehrszentrale
VLSFO	Very Low Sulphur Heavy Fuel Oil (Schweröl mit geringem Schwefelgehalt)
VTG	Verkehrstrennungsgebiet
WECS	Wärtsilä Engine Control System (Motorsteuerung)
WinGD	Winterthur Gas & Diesel
XRF	Röntgenfluoreszenzanalyse



## 1 ZUSAMMENFASSUNG

Am 29. Juli 2020 befand die EBBA MAERSK sich auf der Reise von Felixstowe (Großbritannien) nach Hamburg. Nach Umstellung von einem herkömmlichen Schweröl auf einen schwefelarmen, leichten Kraftstoff kam es zu einem Brand im Spülluftkanal der Hauptmaschine.

Bei der Hauptmaschine der EBBA MAERSK handelt es sich um einen Common-Rail-Motor. Das auf hoher See mit Open-Loop-Scrubber fahrende Schiff muss für Fahrten in SECAs auf einen schwefelarmen Kraftstoff umstellen. Die Menge *schweren*, schwefelarmen Kraftstoffs, die sich an diesem Tag an Bord befand, war für den Fahrtabschnitt die Elbe hinauf bis an die Pier in Hamburg nicht ausreichend. Die Hauptmaschine wurde also (entgegen der sonstigen Praxis) auf einen *leichten*, schwefelarmen Kraftstoff umgestellt, der in ausreichender Menge vorhanden war.

Kurz nach beendeter Umstellung begannen die Abgastemperaturen von drei Zylindern nacheinander über den Normalwert anzusteigen, sodass ein Zylinder elektronisch ausgehängt werden musste. Obwohl dieser nun nicht mehr angesteuert wurde, stieg seine Abgastemperatur nach einer kurzen Abkühlungsphase weiter an.

Kurz darauf liefen in den vorderen sechs der 14 Zylinder Alarmer für „Feuer im Spülluftkanal“ auf. Dies wurde durch die Maschinenbesatzung schnell verifiziert. Sofort wurde mit der Brücke kommuniziert, dass die Maschine ohne Verzögerung heruntergefahren werden müsse. Es wurde umgehend geankert, zunächst östlich und kurz außerhalb des Verkehrstrennungsgebiets „Elbe Approach“.

Das Feuer im Spülluftkanal wurde mithilfe der dafür vorgesehenen Anlage gelöscht. Nach ausreichender Abkühlung des Motors wurde eine ausführliche Kontrolle des Spülluftkanals durchgeführt. Es wurden keine Schäden an den Zylindereinheiten festgestellt. Zwei der sog. „injection control units“ (ICUs) waren jedoch mit einer teerartigen Substanz verstopft. Sie wurden überholt und wieder eingebaut.

Die BSU interessierte bei der Untersuchung dieses Unfalls vor allem die Frage, ob die Besonderheiten der relativ „jungen“ schwefelarmen schweren Kraftstoffe eine Rolle bei der Entstehung des Brandes gespielt haben könnten.

Der Untersuchungsteil des Berichts beginnt mit jeweils einem Grundlagenkapitel zum Thema Begrenzung von Schwefel in Schiffskraftstoffen und zu Schiffskraftstoffen im Allgemeinen. In den darauffolgenden Kapiteln wird zunächst das Schiff, danach der Motor beschrieben, vor allem die Funktionsweise der ICUs.

Weiterhin wird der Kraftstoff-Umstellvorgang eingehender betrachtet, ebenso wie verschiedene Laboranalysen. Auch Publikationen von Wärtsilä, die zu den beobachteten Problemen z. T. bereits Jahre vor dem Unfall veröffentlicht worden waren, wurden in die Untersuchung einbezogen.

Eine Bachelorarbeit, die diesen Schaden zum Thema hatte, lieferte wichtige Erkenntnisse für die Erstellung des Untersuchungsberichts.

## 2 FAKTEN

### 2.1 Schiffsfoto



Abbildung 1: Die EBBA MAERSK beim Anlaufen von Hamburg<sup>1</sup>

### 2.2 Schiffsdaten

Schiffsname:	EBBA MAERSK
Schiffstyp:	Vollcontainerschiff
Flagge:	Dänemark
Heimathafen:	Kopenhagen
IMO-Nummer:	9321524
Unterscheidungssignal:	OXHW2
Eigner:	Mærsk A/S
Reederei:	Mærsk A/S
Baujahr:	2007
Bauwerft:	Odense Staalskibsværft (Lindøvværft)
Klassifikationsgesellschaft:	American Bureau of Shipping
Länge ü.a.:	398,9 m
Breite ü.a.:	56,40 m
Tiefgang maximal:	17,00 m
Bruttoraumzahl:	171.542
Tragfähigkeit:	174.239 / 14.770 TEU <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Quelle: Hasenpusch Photo-Productions, 2018.

<sup>2</sup> TEU: Twenty-Foot Equivalent Unit, Standard-20-Fuß-Container.

Maschinenleistung:	80.080 kW bei 102 min <sup>-1</sup> , auf 54.000 kW limitiert
Hauptmaschine:	Doosan/Wärtsilä 14RT-flex96C (Lizenzbau)
Geschwindigkeit:	24 kn
Werkstoff des Schiffskörpers:	Stahl
Schiffskörperkonstruktion:	herkömmlich (geschlossene Luken, Zellgerüste)
Mindestbesatzung:	13

### 2.3 Reisedaten

Abfahrtshafen:	Felixstowe (UK)
Anlaufhafen:	Hamburg (DE)
Art der Fahrt:	Berufsschiffahrt/international
Angaben zur Ladung:	Container
Besatzung:	25
Tiefgang zum Unfallzeitpunkt:	T <sub>v</sub> = 11,5 m, T <sub>a</sub> = 11,8 m
Lotse an Bord:	Ja
Anzahl Passagiere:	Keine

### 2.4 Angaben zum Seeunfall

Art des Seeunfalls:	Schwerer Seeunfall (SU); Brand im Spülluftkanal der Hauptmaschine
Datum/Uhrzeit <sup>3</sup> :	29. Juli 2020, 07:07 Uhr
Ort:	Anfahrt Elbe, Verkehrstrennungsgebiet „Elbe Approach“
Breite/Länge:	$\varphi = 53^{\circ} 59,3' N$ , $\lambda = 008^{\circ} 09,6'E$
Fahrtabschnitt:	Revierfahrt
Platz an Bord:	Hauptmaschine, Spülluftkanal
Menschlicher Faktor:	Nein
Folgen:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ca. zehn Stunden Reparatur, zunächst direkt östlich des Verkehrstrennungsgebiets „Elbe Approach“, später kurz westlich der Außenelbe-Reede</li> <li>- keine Personen- oder Umweltschäden</li> <li>- keine bleibenden Schäden am Motor</li> </ul>

<sup>3</sup> Alle Zeitangaben im Bericht sind in Ortszeit = mitteleuropäische Sommerzeit MESZ = UTC + 2 h angegeben (Ortszeit am Unfallort).

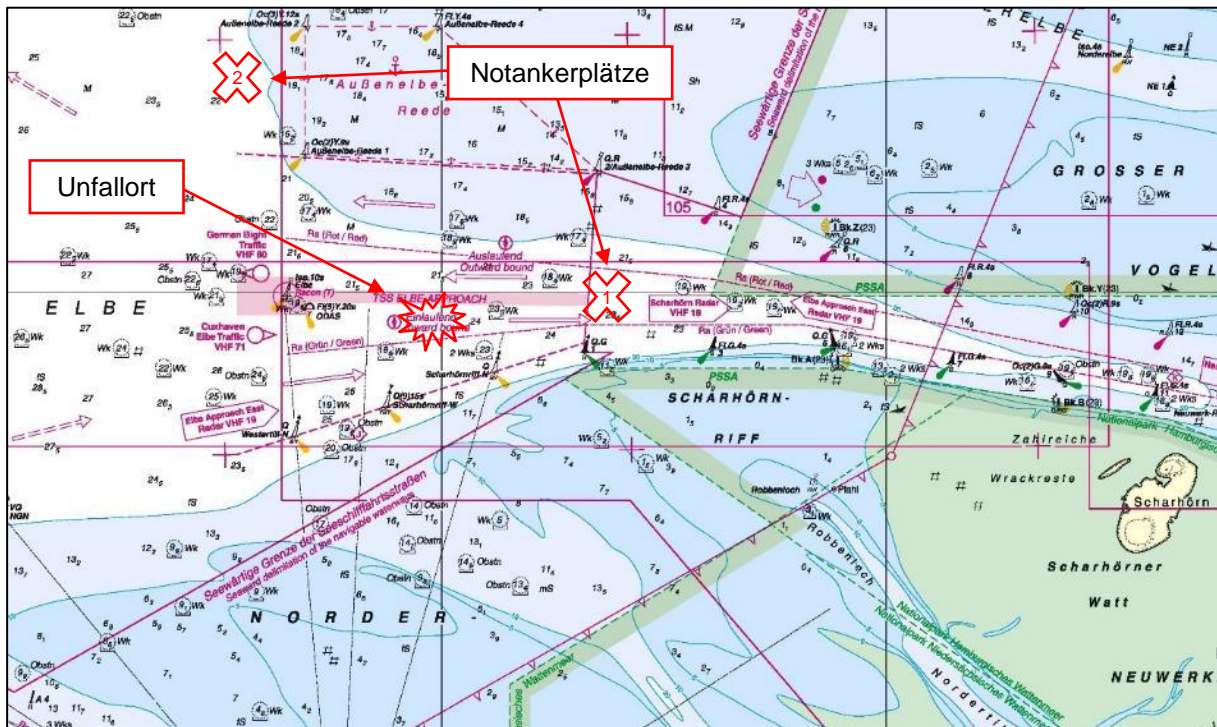


Abbildung 2: Unfallort und Notankerplätze<sup>4</sup>

## 2.5 Einschaltung der Behörden an Land und Notfallmaßnahmen

Beteiligte Stellen:

- VKZ Cuxhaven
- Lotse an Bord zur Kommunikation Schiff/Land

Eingesetzte Mittel (extern):

- Mehrzweckschiff NEUWERK in Bereitschaft
- Radarlotse zur Verkehrssicherung

Ergriffene Maßnahmen:

- Notankerung im Elbefahrwasser
- Brand mit schiffsseitig fest installiertem Feuerlöschsystem gelöscht
- Instandsetzungsarbeiten an drei Einspritzregelungseinheiten (ICUs<sup>5</sup>)
- Testfahrt in der Deutschen Bucht
- am Liegeplatz in Hamburg umfangreiche Servicearbeiten (Spülluftkanal gereinigt, weitere ICUs vorsorglich überholt oder getauscht; Kontrolle von Motor und Spülluftkanal durch einen externen Servicemitarbeiter des Motorenherstellers)

<sup>4</sup> Quelle: Seekarte „Mündungen der Jade, Weser und Elbe“, BSH-Karte Nr. 49 (INT 1463) (Ausschnitt).

<sup>5</sup> ICU: „injection control unit“, regelt die Einspritzung eines Zylinders eines Common-Rail-Motors. Siehe auch Kapitel 3.2.4.3.

## 3 UNFALLHERGANG UND UNTERSUCHUNG

### 3.1 Unfallhergang

#### 3.1.1 Unfall

Am 29. Juli 2020 befand sich die EBBA MAERSK auf der Reise von Felixstowe/UK nach Hamburg.

Das auf hoher See mit Open-Loop-Scrubber<sup>6</sup> fahrende Schiff muss für Fahrten in SECAs<sup>7</sup> auf einen schwefelarmen Kraftstoff umstellen. Die Menge *schweren*, schwefelarmen Kraftstoffs (ULSFO)<sup>8</sup>, die sich an diesem Tag an Bord befand, reichte nicht für den Fahrtabschnitt die Elbe hinauf bis an die Pier in Hamburg. Der Leiter der Maschinenanlage war in Felixstowe gerade erst zugestiegen und hatte die notwendigen Mengen an Bord nicht vorgefunden. Die Hauptmaschine wurde also auf einen *leichten*, schwefelarmen Kraftstoff (LSMGO)<sup>9</sup> umgestellt, der in ausreichender Menge vorhanden war.

Bei einer Umstellung von einem schweren auf einen leichten Kraftstoff wird die komplette Maschinenanlage auf eine deutlich geringere Temperatur gebracht (damit die Viskosität<sup>10</sup> des leichten Kraftstoffs im System hinterher annähernd dieselbe ist wie die des schweren vorher). Während der Motor noch die richtige Temperatur für Schweröl hat, hätte der leichte Kraftstoff kurzzeitig eine zu geringe Viskosität. Aus diesem Grund erfolgt die Umstellung über einen definierten Zeitraum hinweg, in dem die Temperatur langsam heruntergeregelt und dem schweren Kraftstoff gleichzeitig ein zunehmender Anteil leichten Kraftstoffs zugesetzt wird, um theoretisch immer die „richtige“ Viskosität für die jeweils herrschende Bauteiltemperatur zu erzielen. Am Unfalltag erfolgte die Umstellung ab ca. 01:50 Uhr gemäß einer Verfahrensanweisung<sup>11</sup> von Maersk und einer Regelungseinheit, die die Mischungs- und Abkühlungsrate während des Umstellungsprozesses automatisch einstellt.

Die Hauptmaschine war mehrere Monate lang nicht mehr mit einem leichten Kraftstoff betrieben worden. Normalerweise wurde auf schwefelarmes Schweröl zurückgegriffen, um den Umstellvorgang zu beschleunigen, da in dem Fall das beschriebene Gefälle zwischen den für die beiden Kraftstoffe jeweils notwendigen Betriebstemperaturen nicht vorliegt.

Kurz bevor der Umstellvorgang gegen 04:15 Uhr beendet war, wurden um 03:27 Uhr (lt. Alarm-Event-Log) an zwei Zylindern erhöhte Laufbuchsentemperaturen festgestellt. Als Zylinder 10 gegen 04:45 Uhr zusätzlich noch eine erhöhte Kühlwassertemperatur

---

<sup>6</sup> Für Scrubber siehe Kapitel 3.2.1.33.2.1.3.

<sup>7</sup> sog. „sulphur emission control areas“ gemäß MARPOL Anlage VI, siehe auch Kapitel 3.2.1.1.

<sup>8</sup> „ultra-low-sulphur heavy fuel oil“, ULSFO, siehe auch Kapitel 3.2.2.

<sup>9</sup> „low-sulphur marine gas oil“, LSMGO, siehe auch Kapitel 3.2.2.

<sup>10</sup> Viskosität: Zähflüssigkeit, verändert sich mit der Temperatur.

<sup>11</sup> Meist engl. „procedure“: Vorgangsbeschreibung und Vorschrift für die Ausführung einer Arbeit an Bord. Teil des ISM-Systems (International Safety Management System, Internationales Sicherheitsmanagementsystem, bezeichnet Maßnahmen zur Dokumentation und Organisation eines sicheren Schiffsbetriebs).

meldete und um 04:55 Uhr eine erhöhte Abgastemperatur, wurde er gegen 05:00 Uhr „ausgehängt“<sup>12</sup>. Zu einem Aushängen von Zylinder 5 kam es im weiteren Verlauf nicht.

Eine erhöhte Laufbuchsentemperatur macht sich in einem sog. „friction alarm“ bemerkbar (Alarm, der auf erhöhte Reibung zwischen Kolben und Laufbuchse hinweist, die zu gefährlichen Schäden führen kann und von Temperatursensoren ausgelöst wird). Dieser kann z. B. bei Kraftstoffen mit hohem Cat-Fine-Anteil<sup>13</sup> auftreten, also aufgrund von ungewollter mechanischer Reibung. Der Leiter der Maschinenanlage („Chief“) ließ am Zylinder eine Zylinderschmierölprobe entnehmen und direkt mit einem Analysegerät untersuchen, um festzustellen, ob sich Metallabrieb im Öl befand. Dies war nicht der Fall. Der Alarm war also nicht in erhöhter Reibung begründet, sondern in einer Temperaturerhöhung anderen Ursprungs.

Nur eine halbe Stunde nach dessen Aushängen begann die Abgastemperatur in Zylinder 10 wieder zu steigen (nachdem sie zunächst erwartungsgemäß heruntergegangen war), obwohl die ICU nicht angesteuert wurde, es also eigentlich zu keiner Einspritzung kommen konnte.

Besatzungsmitglieder, die daraufhin vom Leiter der Maschinenanlage vor Ort geschickt wurden, um sich ein Bild zu machen, berichteten, dass an der vorderen Einspritzleitung des ausgehängten Zylinders 10 trotz des Aushängens dennoch weiter Druckpulsationen zu fühlen waren. Deren Frequenz sei dabei stark erhöht gewesen – „like a machine gun“ (wie ein Maschinengewehr).

---

<sup>12</sup> „Aushängen“ bedeutet bei diesen modernen Motoren, dass im elektronischen Überwachungssystem des Motors die ICU ausgeschaltet und nicht mehr angesteuert wird (siehe Kapitel 3.2.4.3). Im Gegensatz zur ursprünglichen Bedeutung des „Aushängens“ eines Zylinders bewegt der Kolben sich hierbei weiter auf und ab, komprimiert also weiterhin bis zum Zünddruck, nur ohne Einspritzung.

<sup>13</sup> Sog. „cat fines“ sind sehr kleine, sehr harte und scharfkantige Katalysatorrückstände auf Basis von Aluminium- und Siliziumoxid, die aus komplexen Raffinationsprozessen stammen und zu erheblich erhöhter abrasiver Reibung zwischen Kolben/Kolbenringen und Laufbuchse führen können. Ihr Vorkommen in Kraftstoffen kann zur Zerstörung der gesamten Zylindereinheit (Buchse, Kolben, Kolbenringe) führen. Durch ihre Größe und Hydrophilie sind sie schwer aus dem Schweröl herauszuseparieren.



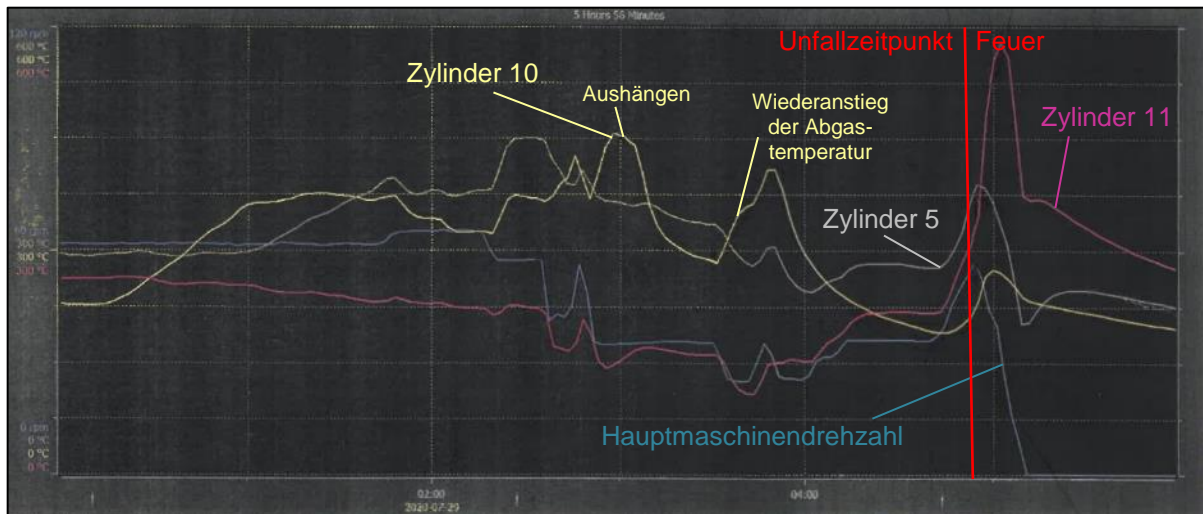


Abbildung 3: Verlauf einzelner Abgastemperaturen und Hauptmaschinendrehzahl<sup>14</sup>  
etwa zwischen 02:00 und 08:00 Uhr Ortszeit

Um 06:56 Uhr liefen Alarmer für „Feuer im Spülluftkanal“ für die Zylinder 8 bis 13 auf. Um zu verifizieren, dass es sich tatsächlich um einen Brand (und nicht um einen Sensorfehler) handelte, schickte der Chief einen Motormann<sup>15</sup> mit Infrarotthermometer in den Maschinenraum, um die Temperatur kontaktlos direkt an der Maschine zu messen. Er kam sehr schnell wieder zurück und berichtete, der Anstrich am Spülluftkanal sei schwarz verfärbt und werfe Blasen. Damit waren letzte Zweifel ausgeräumt. Gleichzeitig fielen zwei der Temperatursensoren in den Zylindern ganz aus (die angezeigte Temperatur fiel schlagartig auf offensichtlich falsche -200 °C). Später stellte sich heraus, dass sie geschmolzen waren.

Sofort wurde mit der Brücke kommuniziert, dass die Maschine umgehend heruntergefahren werden müsse und keine Zeit bleibe, einen weiter entfernten sicheren Ankerplatz aufzusuchen. Die EBBA MAERSK befand sich zu dem Zeitpunkt ostgehend im Verkehrstrennungsgebiet (VTG) „Elbe Approach“ und war bereits lotsbesetzt. Geankert wurde direkt hinter der Ausfahrt des VTG, östlich seines Trennstreifens, also zwischen den Verkehrsströmen (siehe auch Abbildung 2). Nachdem zeitgleich mit der Kommunikation mit der Brücke der Maschinenraum evakuiert worden war, wurde ab 07:10 Uhr die Hauptmaschine heruntergefahren.

Wieder mithilfe der dafür erstellten Verfahrensanweisung von Maersk wurde das Feuer im Spülluftkanal gelöscht (Herunterfahren der Drehzahl, Ausstellen der Hilfsgebläse zur Minimierung der Sauerstoffzufuhr, Absperrung der Kraftstoffzufuhr, Absperrung der Schmierölaufuhr, 07:25 Uhr Auslösung der in den Motor integrierten Wassersprühnebel-Löschanlage des Spülluftkanals). Um 07:41 Uhr meldete der Lotse an die Verkehrszentrale Cuxhaven, dass die Temperatur im Spülluftkanal wieder gesunken sei.

Nach ausreichender Abkühlung des Hauptmotors wurde eine ausführliche Kontrolle des Spülluftkanals inkl. Kolben, Buchsen, Kolbenringen, ICUs etc. durchgeführt. Es

<sup>14</sup> Quelle: Besatzung, Ausdruck aus dem WECS („Wärtsilä Engine Control System“).

<sup>15</sup> Motormann: Mannschaftsdienstgrad der Maschinenbesatzung.

wurden keine Schäden an den Zylindereinheiten festgestellt. Die ICUs der Zylinder 10 und 5 jedoch waren mit einer teerartigen Substanz verstopft.

Um schnell weiterfahren zu können, wollte der Leiter der Maschinenanlage eine der ICUs vorläufig mit einer dafür vorgesehenen Absperrschraube drucklos machen (also den Kraftstoffzufluss absperren und sie auch mechanisch außer Betrieb nehmen, ohne sie ausbauen zu müssen). Die Schraube wies jedoch Schäden an ihrer Dichtfläche auf. Beide ICUs mussten also mit den beiden letzten sich an Bord befindlichen „overhaul kits“ überholt und dann wieder eingebaut werden. Der Zweite Technische Offizier arbeitete die Dichtschraube derweil auf.

Der Lotse verlangte vor der Einfahrt in die Elbe, dass mit einer Probefahrt demonstriert werde, dass keine Gefahr mehr vorliege. Bereits kurz nach dem Aufnehmen des Ankers kam es jedoch zu demselben Phänomen wie vorher: Die Abgastemperaturen eines Zylinders, diesmal Zylinder 4, stiegen stark an. Kurz westlich der Außenelbe-Reede ankerte das Schiff gegen 03:30 Uhr am 30. Juli 2020 erneut.

Diesmal wurde die betroffene ICU zusätzlich zum elektronischen „Aushängen“ mit der nun aufgearbeiteten Dichtschraube erfolgreich außer Betrieb genommen.

Die Probefahrt wurde fortgesetzt und verlief ohne erneute Vorkommnisse. Die EBBA MAERSK lief um ca. 07:45 Uhr am 30. Juli 2020 in das Revier Elbe ein.

### **3.1.2 Weiterer Verlauf**

In Hamburg kam ein Service von Wärtsilä an Bord und bestätigte die Diagnose des Chiefs, dass durch den Brand weder Buchsen, Kolben noch Kolbenringe Schaden genommen hatten (siehe auch Kapitel 3.1.4). Neben den verstopften ICUs und leichten Rostspuren vom Löschwasser der Wassersprühnebel-Löschanlage waren die geschmolzenen Temperatursensoren der einzige zu beklagende Schaden. Auch die Klassifikationsgesellschaft ABS war bei der Inspektion zugegen und kam zu demselben Schluss.

Der für das Schiff zuständige Inspektor der Reederei schickte mehrere „Overhaul Kits“ und eine komplette neue ICU an Bord der EBBA MAERSK, um für weitere Vorfälle gerüstet zu sein. Auch ICU 4 wurde überholt und wieder eingebaut.

Es wurden unmittelbar Kraftstoffproben entnommen und für den nächsten Hafen Antwerpen (Belgien) eine umfassende Kraftstoffanalyse bestellt, bei der u. a. auch Kompatibilitätstests der verschiedenen Kraftstoffe durchgeführt wurden (siehe auch Kapitel 3.2.2.2 und 3.2.5.3).

Nachdem sich die Klassifikationsgesellschaft und die BG Verkehr davon überzeugt hatten, dass kein dauerhafter Schaden vorlag und die fehlerhaften ICUs ausgetauscht bzw. überholt worden waren, durfte die EBBA MAERSK ihre Reise fortsetzen. Ein ähnlicher Vorfall wiederholte sich auf dem Schiff nicht.

### **3.1.3 Schadensbild**

Bei der Begehung durch die BSU am 30.07.2020 waren die Brandspuren in und an der Hauptmaschine noch deutlich zu sehen.





Abbildung 4: Zwischenboden mit Stopfbuchse eines betroffenen Zylinders<sup>16</sup> mit Löschwasser-Rostspuren

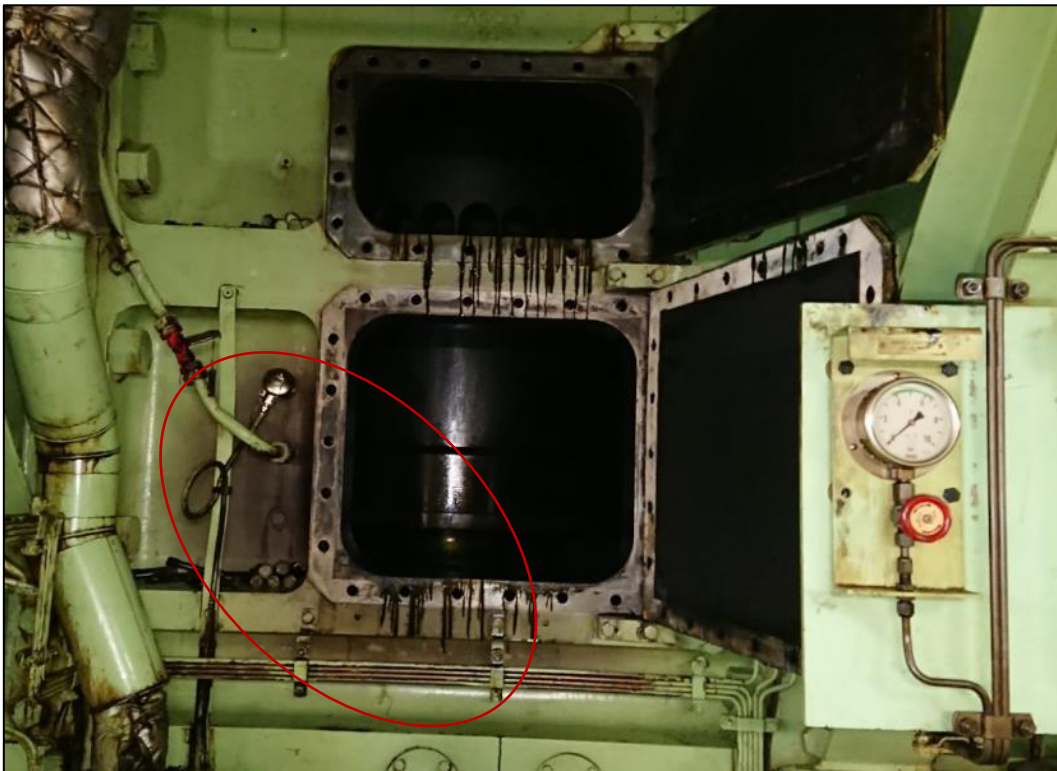


Abbildung 5: Von hohen Temperaturen verfärbter Anstrich der Hauptmaschine neben der Spülluftkanal-Inspektionsklappe eines vom Brand betroffenen Zylinders

Die ICU von Zylinder 4 befand sich in der bordseitigen Überholung und konnte im zerlegten Zustand begutachtet werden.

<sup>16</sup> Quelle Abbildung 4 bis Abbildung 7: Besatzung.



Abbildung 6: Ausgebaute und zerlegte ICU  
mit den drei Einspritzsteuerventilen (links) und dem Mengenkolben (in der Hand)

Die sog. „neutralen Räume“ zwischen den sog. „Rail Valves“ (wörtl. „Leitungsventile“, im Folgenden „Magnetventile“) und den Einspritzsteuerventilen waren deutlich mit einer teerartigen Substanz zugesetzt.<sup>17</sup>



Abbildung 7: Mit teerartiger Substanz verstopfte „neutrale Räume“ einer ICU

<sup>17</sup> Detaillierte Ausführungen in Kapitel 3.2.4.3., siehe auch Abbildung 28.

Für das Überholen der ICUs stand der Besatzung ein sog. „Technical Bulletin“<sup>18</sup> (Technical Bulletin RT-137) von Wärtsilä sowie den Reparaturkits beiliegende, detaillierte Reparaturanleitungen zur Verfügung.

Auch die Untersucher der BSU ließen von den beiden Kraftstoffen, die an der Kraftstoffumstellung beteiligt gewesen waren (HFO und LSMGO), sowie von dem schwefelarmen Schweröl (ULSFO), auf das bislang in SECAs umgestellt worden war, für spätere Analysen Proben entnehmen. Später wurde ihnen vom Leiter der Maschinenanlage auch eine Probe der teerartigen Substanz übersandt, mit denen Teile der ICUs zugesetzt gewesen waren.

### **3.1.4 Wärtsilä Service Report**

Am 30.07.2020 kam ein Servicetechniker von Wärtsilä an Bord und begutachtete die Hauptmaschine. Eine ausführliche Kontrolle der betroffenen Kolben, Kolbenringe und Laufbuchsen sowie der ausgebauten ICUs wurde durchgeführt und fotografisch dokumentiert.

Der Techniker kam zu dem Schluss, dass es durch die ICU des betroffenen Zylinders 10 auch im ausgehängten Zustand weiter zu unkontrollierten Kraftstoffeinspritzungen gekommen sein müsse. Dies habe zu einer Ansammlung von Gasöl auf dem Kolben geführt, das sich dann mit der Kolbenbewegung verteilt habe und letztendlich auch über die Spülschlitze der Laufbuchse in den Spülluftkanal gelangt sei (und damit nicht nur auf, sondern auch unter den Kolben). Mit der Zeit (der Motor war auf Betriebstemperatur und vor allem wurde im Zylinder weiter komprimiert) habe der Kraftstoff sich dann entzündet.

Wie bereits vom Schiff festgestellt, hatte auch nach Wärtsilä-Diagnose keine der Zylindereinheiten einen dauerhaften Schaden davongetragen. Die einzige festgestellte Unregelmäßigkeit waren Spuren von Säurekorrosion (engl. „cold corrosion“) an der Laufbuchse von Zylinder 1, die jedoch in keinem direkten Zusammenhang mit dem Feuer standen.

---

<sup>18</sup> „Technical Bulletin“, auch „Service Bulletin“: Dokument, das z. B. von einem Motorenhersteller wie Wärtsilä an seine Kunden herausgegeben wird, um Einzelheiten zu technischen Änderungen und/oder aktualisierte Verfahrensanweisungen mitzuteilen.



### 3.1.5 Aufzeichnungen

#### 3.1.5.1 Track



Abbildung 8: Track der EBBMA MAERSK, Unfall, Notankerplätze, Probefahrt<sup>19</sup>

<sup>19</sup> Quelle Abbildung 8 und Abbildung 9: MarineTraffic (abgerufen 2020)

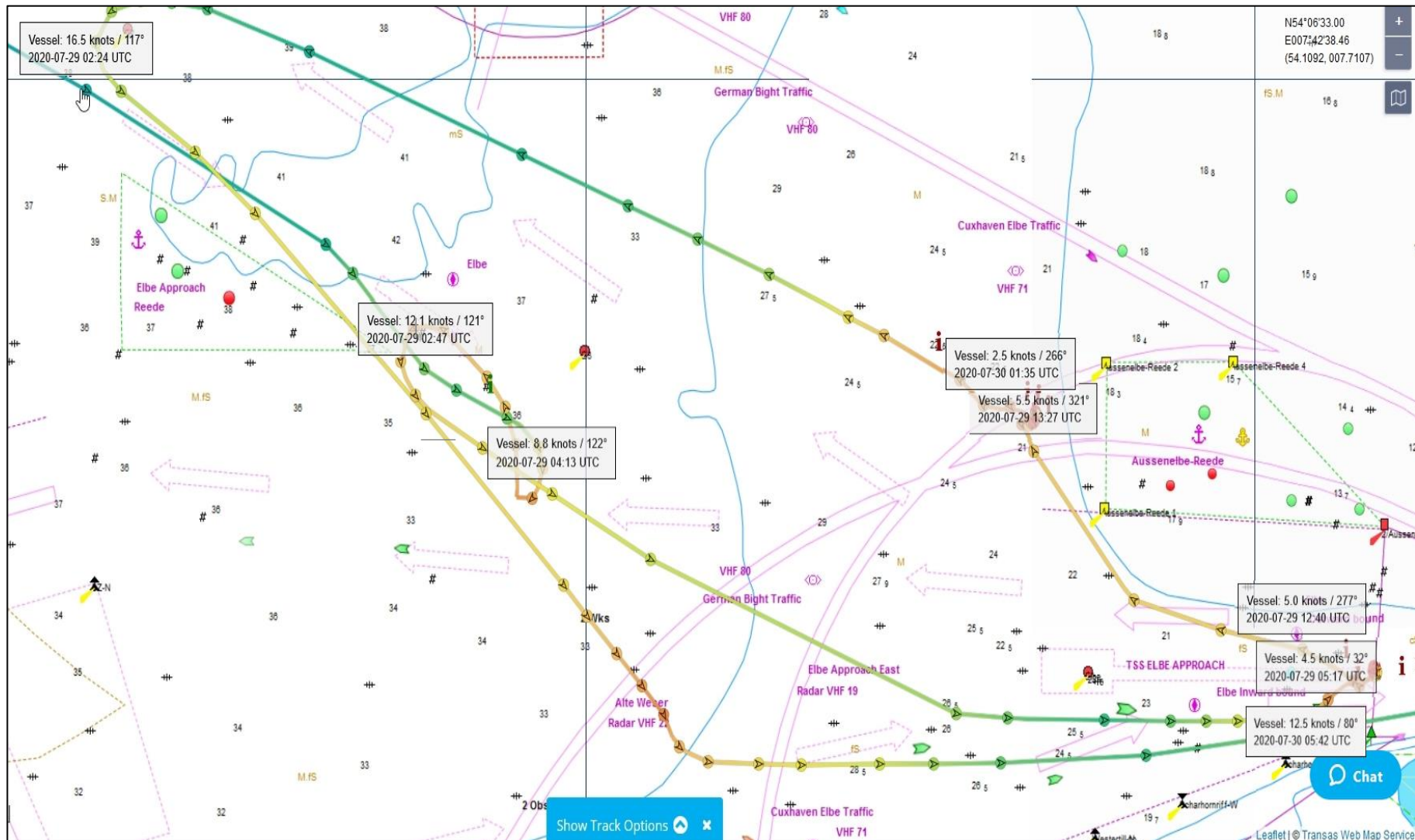


Abbildung 9: Track der EBBA MAERSK, Detail mit Zeitstempeln (UTC)

### **3.1.5.2 Alarmschreiber**

Der vom Leiter der Maschinenanlage geschilderte Unfallablauf konnte durch den Alarmschreiber des WECS (Wärtsilä Engine Control System, Motorsteuerung) bestätigt werden (liegt der BSU für den Unfallzeitraum vor). Im Folgenden einige Beispiele:

Zunächst belegt eine Anzahl von Alarmen die Kraftstoffumstellung (Temperaturveränderung in der Regelungseinheit für die Kraftstoffumstellung, Temperaturveränderung des Kraftstoffs vor der Maschine etc.). Die erhöhten Laufbuchsen- und Zylinderkühlwassertemperaturen lassen sich in der geschilderten Reihenfolge ebenso plausibel nachvollziehen wie die Spülluftkanal-Feueralarme für die einzelnen Zylinder.

Der Löschvorgang zeichnet sich erstmalig um 07:25 Uhr mit einem Alarm wegen fallenden Ladeluftdrucks ab (die Hilfsgebläse wurden ausgeschaltet) sowie mit mehreren Alarmen, die das manuelle (also schnellstmögliche) Herunterfahren der Hauptmaschine begleiten. Später belegt ein Alarm über Wasser in der Maschinenraumbilge das Ablassen des Löschwassers (das natürlich nicht im Motor verbleiben konnte).

Um 07:28 Uhr wird erstmalig der Betrieb (wahrscheinlich das Klarmachen) der Ankerwinde angezeigt, eine knappe halbe Stunde später der Betrieb der beiden Strahlruder, mit denen das Ankermanöver unterstützt bzw. finalisiert wurde.

Um 08:10 Uhr findet sich mit der Aktivierung der Törnmaschine des Hauptmotors der erste Hinweis auf die Begehung des Spülluftkanals.

## **3.2 Untersuchung**

Zwei Aspekte spielten eine Rolle bei der Entscheidung der BSU, diesen Unfall zu untersuchen. Zum einen sollte der Frage nachgegangen werden, ob die Veränderungen bei schweren Schiffskraftstoffen seit 2015 (siehe nachfolgende Grundlagenkapitel) in speziellen Konstellationen eine Unfall- bzw. Feuergefahr darstellen, und wenn ja, welche genau. Zum anderen hätte der Unfall weitaus schwerere Folgen haben können: Wäre der Brand im Spülluftkanal nicht so schnell gelöscht worden, hätte er das Umlauföl im Trieb des Motors so erhitzen können, dass es im schlimmsten Fall zu einer Kurbelraumexplosion hätte kommen können. Der Unfall hätte dann einen sehr viel größeren Schaden verursacht und schlimmstenfalls womöglich Leben gekostet.

Die Untersuchungstätigkeiten der BSU sowie deren Auswertung erfolgten vor dem Hintergrund spezieller rechtlicher und schiffstechnischer Grundlagen. Im Folgenden wird der Beschreibung der Untersuchungstätigkeiten ein Abriss dieser Grundlagen vorangestellt, um ein besseres Verständnis zu ermöglichen.

### 3.2.1 Hintergrund: Begrenzung von Schwefel in Schiffsabgasen

Das Feuer im Spülluftkanal der EBBA MAERSK fiel in eine Phase stetiger Verschärfungen von Abgasvorschriften (siehe nachfolgendes Kapitel 3.2.1.1), die 2020 ein weiteres Mal verschärft worden waren.

#### 3.2.1.1 MARPOL Anlage VI<sup>20</sup>

Die Website des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) beschreibt die Anlage VI zum MARPOL-Übereinkommen knapp folgendermaßen: „Das Internationale Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe (MARPOL-Übereinkommen) vom 02.11.1973 ist ein Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt.“ [...] „Die Anlage VI (am 19.05.2005 in Kraft getreten) dient der Verhütung der Verschmutzung der Luft durch Seeschiffe. In dieser Anlage wurden unter anderem Grenzwerte für Stickoxide und Schwefeloxide festgelegt.“<sup>21</sup>

Das MARPOL-Übereinkommen wurde von den Mitgliedsstaaten der Internationalen Maritimen Organisation (IMO) entwickelt und wird regelmäßig vom IMO-Unterausschuss „Marine Environment Protection Committee“ (MEPC), der MARPOL-Vertragsstaatenkonferenz, modifiziert und ergänzt.<sup>22</sup>

Regel 14 der Anlage VI des Übereinkommens definiert u. a. den Begriff „ECA“ (emission control area). Hierbei handelt es sich um Seegebiete, die als Sonderzonen ausgewiesen sind und in denen spezielle Umweltrichtlinien zu Emissionen z. B. durch Abgase gelten. ECAs, in denen Grenzwerte für Abgasemissionen speziell von Schwefel festgelegt sind, werden als „SECA“ (sulphur bzw. SO<sub>x</sub> emission control area) bezeichnet. Für die Zwecke dieser Unfalluntersuchung wird in diesem Bericht nur auf Schwefelemissionen und SECAs sowie deren praktische Bedeutung für die Schifffahrt eingegangen. Aspekte der Emissionsbegrenzung von Stickoxiden, Abwasser, Lärm etc. werden hier nicht betrachtet.

In Europa sind seit 2007 die gesamte Ost- und Nordsee mit dem Ärmelkanal sowie alle dazugehörigen Häfen SECAs. Ab dem 1. Mai 2025 wird das Mittelmeer ebenfalls SECA. Gleichzeitig reguliert das Übereinkommen auch weltweit die Schwefelemissionen durch Schiffsabgase (also auch auf hoher See).<sup>23 24</sup>

Abbildung 10 zeigt die progressive Absenkung der erlaubten Schwefelgrenzwerte in SECAs und weltweit seit 2008. Die Prozentwerte beziehen sich auf den Schwefelmassenanteil im verbrannten Kraftstoff. Die Begrenzung des erlaubten Kraftstoff-Schwefelanteils wird auch als „Sulphur Cap“ (etwa „Schwefeldeckelung“) bezeichnet.<sup>25</sup> Seit 2020 ist weltweit ein Grenzwert von 0,5 % vorgeschrieben, in SECAs bereits seit 2015 0,1 %.

---

<sup>20</sup> Quelle: NZ Ministry of Transport, *MARPOL Annex VI treaty text* (abgerufen 2022).

<sup>21</sup> Quelle: BSH, *Umwelt und Schifffahrt: MARPOL* (abgerufen 2022).

<sup>22</sup> Quelle: IMO, *Our work: Air pollution* (abgerufen 2022).

<sup>23</sup> Quelle: IMO, *Our work: Special MARPOL areas* (abgerufen 2022).

<sup>24</sup> Quelle: Täglicher Hafenbericht THB, *IMO macht Mittelmeer zur ECA-Schutzzone* (2022).

<sup>25</sup> Quelle: DNV, *Global Sulphur Cap* (abgerufen 2022).



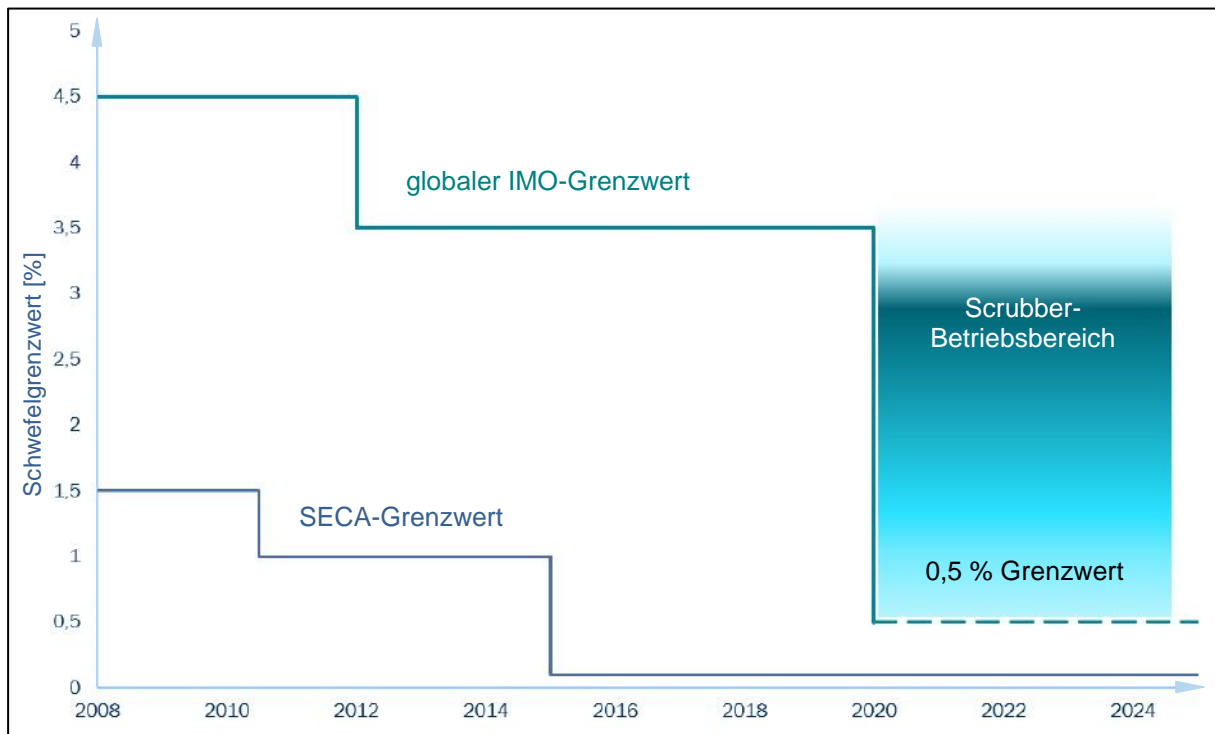


Abbildung 10: IMO-Schwefelgrenzwerte<sup>26</sup>

Die IMO schätzt, dass durch diese Vorgaben die globale Schwefelemissionsmenge von Schiffen bis 2025 um 77 % reduziert werden kann.<sup>27</sup>

### 3.2.1.2 Schwefelemissionen durch Schiffsabgase

Schweröle sind im Prinzip Raffinerierückstände. Diejenigen Rohölanteile, die durch den Raffinationsprozess nicht herausdestilliert werden, bleiben im Schweröl zurück. Der in den verschiedenen Rohölsorten molekular gebundene Schwefel gehört zu diesen zurückbleibenden Substanzen und wird bei der Verbrennung der Schweröle frei (siehe auch Kapitel 3.2.2).

Bei den hohen Verbrennungstemperaturen ist der molekulare Schwefel reaktionsfreudig, oxidiert mit Umgebungssauerstoff zunächst zu Schwefeldioxid und ggf. im nächsten Schritt zu Schwefeltrioxid. Diese beiden Stoffe verbinden sich dann mit dem ebenfalls im Abgas enthaltenen Wasserdampf zu schwefliger Säure bzw. Schwefelsäure<sup>28</sup>:

Diese wasserlöslichen und extrem ätzenden Schwefelsäuren (und andere beim Verbrennungsprozess entstehende Säuren), die mit dem Abgas in die Atmosphäre gelangen, regnen als sog. „saurer Regen“ wieder auf die Erde und Meere hinab. Die Absenkung des pH-Wertes<sup>29</sup> („Versauerung“) von Böden und Gewässern führt zu einer

<sup>26</sup> Quelle: *Wärtsilä Technical Bulletin RT-229: Operational Guidance to the global Sulphur Cap 2020* (2019). Übersetzung: BSU.

<sup>27</sup> Quelle: IMO, *Hot topics: Sulphur 2020* (2020).

<sup>28</sup> Quelle: EGCSA, *EGCSA Handbook 2012* (2012).

<sup>29</sup> pH-Wert: „potentia hydrogenii“, lat. „Potential des Wasserstoffs“, Maß für den sauren oder basischen Charakter einer wässrigen Lösung. Je niedriger der von 0-14 reichende Wert, desto saurer die Lösung. Ist der pH-Wert = 7, ist die Lösung neutral (z. B. reines Wasser).



Zerstörung des ökologischen Gleichgewichts: Pflanzen (auch Nutzpflanzen wie Getreide) sind in ihrem Wachstum gestört oder gehen ein, Nährstoffe werden aus den Böden ausgewaschen und Schwermetalle gelöst, die Artenvielfalt in den Meeren geht zurück, an Land kommt es zu Gebäudeschäden, die eigentlich leicht basischen Ozeane verlieren ihre Fähigkeit, saures CO<sub>2</sub> zu binden, beim Menschen kommt es zu z. T. gravierenden Gesundheitsschäden.<sup>30</sup> Die Vorgaben der Anlage VI des MARPOL-Übereinkommens sollen u. a. diesen Folgeschäden entgegenwirken.

### 3.2.1.3 Umsetzung der Schwefel-Emissionsvorgaben

Seeschiffe haben verschiedene Möglichkeiten, diese Vorgaben einzuhalten.

#### 1) Schwefelarmen Kraftstoff verwenden

Hier kommen zum einen schwefelarme Schiffskraftstoffe infrage, die leichter sind als Schweröl. Im Raffinationsprozess werden die leichteren Produkte vom schweren Grundstoff getrennt (siehe Kapitel 3.2.2.1). Hierbei kann auch eine Entschwefelung vorgenommen werden. Dies passiert nicht immer, ist jedoch möglich. Schwefelarme, leichte Kraftstoffe sind jedoch erheblich teurer als klassische Schweröle.<sup>31</sup>

Zum anderen wurden für einen Schiffsbetrieb, bei dem nicht bei jedem Wechsel von einem Seegebiet in ein anderes (SECA oder offene See) von einem schweren auf einen leichteren Kraftstoff oder umgekehrt umgestellt werden muss, schwefelarme Schweröle entwickelt. Wie in Kapitel 3.2.2.4 detaillierter erläutert, handelt es sich hierbei aber nicht um entschwefelte klassische Schweröle, da dies prozesstechnisch nicht möglich ist, sondern um Gemische aus Schweröl, leichteren schwefelarmen Kraftstoffen und verschiedenen anderen Substanzen. Diese „neuen“ Schweröle verhalten sich im Betrieb so ähnlich wie klassische Schweröle und haben einen ähnlichen Brennwert, können aber dennoch zu Problemen führen, die es vorher in dieser Verbreitung nicht gab. Auch sie sind teurer als herkömmliches Schweröl, jedoch ein wenig preiswerter als leichte Kraftstoffe.

Auch bei der immer gängigeren Nutzung von LNG („Liquefied Natural Gas“, verflüssigtes Erdgas), das von Natur aus schwefelarm ist, wird ein schwefelarmer Kraftstoff verwendet.<sup>26</sup>

#### 2) Schwefeligen Kraftstoff verwenden und das Abgas entschwefeln<sup>28 32</sup>

Nach Regel 4.1 der Anlage VI zum MARPOL-Übereinkommen dürfen Vertragsstaaten (Küstenstaaten) alternative, emissionsmindernde Verfahren erlauben, vorausgesetzt, deren Einsatz ist mindestens so effektiv wie die in Regel 14 vorgesehenen Methoden. Ein derartiges alternatives Verfahren ist die Entschwefelung der beim Verbrennen herkömmlicher Kraftstoffe entstehenden Abgase.

Eine Abgas-Entschwefelungsanlage wird auch „Scrubber“ (wörtl. „Schrubber“) genannt. Ein Scrubber löst die schwefeligen Bestandteile aus einem Abgas, und zwar

<sup>30</sup> Quelle: KATALYSE Institut, *Umweltlexikon: Saurer Regen* (abgerufen 2022).

<sup>31</sup> Quelle: Energielexikon, *Schweröl* (abgerufen 2022).

<sup>32</sup> Quelle: EGCSA, *Rechtliche Vorgaben zum Umgang mit Schiffsabwasser* (abgerufen 2022).

entweder trocken mithilfe eines basischen Granulats oder nass mit Seewasser, das wie gesagt von Natur aus basisch ist, oder Frischwasser mit einem basischen Zusatz (jeweils „Waschwasser“ genannt). Nach dem Prozess liegt der Schwefel im Granulat oder Waschwasser gebunden vor.

In der simpelsten Ausführung wird das Waschwasser wieder außenbords geleitet (bei der Einleitung in das entsprechende Gewässer wird von „Scrubber-Wasser“ gesprochen). Der Waschwasserkreislauf ist dann nach außenbords offen, also wird diese Ausführung „Open Loop“ („offener Kreislauf“) genannt.

Ein Teil der Schadstoffe, die nicht in die Atmosphäre gelangen sollen, weil sie sonst über den Regenkreislauf u. a. in die Meere gelangen, wird hier also direkt in die Meere eingeleitet. Aufgrund dieses offensichtlichen Widerspruchs und der auch in einer schwedischen Studie nachgewiesenen erheblichen Belastungen durch Scrubber-Wasser wird z. B. von Schweden über ein grundsätzliches Verbot von Open-Loop-Scrubbern nachgedacht.<sup>33</sup> Deutschland, Singapur und China untersagten die Verwendung von Open-Loop-Scrubbern in ihren Hafen- und Binnengewässern bereits vor 2020.<sup>34</sup> Dennoch waren im Jahr 2019 von allen DNV GL<sup>35</sup>-zertifizierten 2696 bestellten und bereits im Einsatz befindlichen Scrubber-Anlagen 2130 Open-Loop-Anlagen (also 79 %).<sup>34</sup>

Soll nach dem Abgasreinigungsprozess kein Waschwasser nach außenbords gelangen, muss eine Scrubber-Anlage mit geschlossenem Waschwasserkreislauf installiert werden, deren Anordnung entsprechend „Closed-Loop“ genannt wird. Das Waschwasser wird hier in einem Haltetank gesammelt und an Land abgegeben.

Es gibt auch hybride Scrubber-Anlagen, die sowohl im Open-Loop- als auch im Closed-Loop-Betrieb gefahren werden können. Sie enthalten alle für beide Betriebsarten notwendigen Anlagenkomponenten, die entsprechend zugeschaltet oder abgesperrt werden können.



Abbildung 11: vereinfachte Visualisierungen der verschiedenen Scrubber-Arten<sup>36</sup>

<sup>33</sup> Quelle: Chalmers University of Technology (Schweden), *Research reveals large emissions from ship scrubbers*, Studie zum schädlichen Effekt der Einleitung von Scrubber-Abwasser (abgerufen 2022).

<sup>34</sup> Quelle: Täglicher Hafenbericht THB, *Scrubber mit Fragezeichen* (2019).

<sup>35</sup> DNV GL: Klassifikationsgesellschaft, die 2013 aus dem Zusammenschluss der norwegischen Det Norske Veritas und der deutschen Germanischer Lloyd entstand und seit dem 1. März 2021 nur noch unter dem Namen DNV firmiert. Quelle: DNV, *Namensänderung: DNV GL wird DNV* (abgerufen 2022).

<sup>36</sup> Quelle: VDL AEC Maritime, *Why choose a scrubber?*“ (abgerufen 2022).

Die EBBA MAERSK fuhr zum Zeitpunkt des Unfalls auf hoher See mit herkömmlichem, schwefelhaltigem Schweröl und einer Open-Loop-Scrubber-Anlage, sowie in den Reviergewässern, in denen Open-Loop-Scrubber verboten waren, mit schwefelarmem Schweröl. Zum Unfallzeitpunkt war der Einsatz des Scrubbers im vorherigen Seehafen Felixstowe erlaubt, in deutschen Küstengewässern hingegen nicht. Schwefelarmes Schweröl war jedoch nicht in ausreichender Menge an Bord, also wurde auf leichtes, schwefelarmes Gasöl umgestellt (siehe auch Kapitel 3.1.1).

### 3.2.2 Hintergrund: Schiffskraftstoffe<sup>37 38 39 40</sup>

Für ein Verständnis der Eigenschaften schwefelarmer Kraftstoffe im Allgemeinen und schwefelarmer Schweröle im Speziellen erfolgt hier zunächst ein grober Abriss über herkömmliche, auf Schiffen eingesetzte Kraftstoffe.

#### 3.2.2.1 Allgemeines

Im Raffinationsprozess werden dem Erdöl in verschiedenen Verfahren wie Destillation oder „katalytisches Cracken“, auf die hier nicht näher eingegangen wird, die leichteren Komponenten entzogen. Dabei entstehen neben Erdgas z. B. die folgenden leichten Kraftstoffe:

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kerosin</li> <li>- Benzin (≙ Ottokraftstoff)</li> <li>- Dieselmkraftstoff</li> <li>- Marine Gasöl (MGO)</li> <li>- Marine Dieselöl (MDO)</li> </ul>	<p>klarer ↓</p> <p>trüber ↓</p>	<p>heller (gelb)</p> <p>dunkler (braun/schwarz) ↓</p>	<p>leichter ↓</p> <p>schwerer ↓</p>
--	---------------------------------	---	-------------------------------------

Die Substanz, die nach dem Entziehen dieser leichten Komponenten übrigbleibt, entspricht im Prinzip dem klassischen Schweröl, mit dem Großmotoren auf Schiffen betrieben wurden und werden. Es ist quasi das Abfallprodukt des Raffinerieprozesses und wird auch als „Marines Rückstandsöl“, „Bunker C“ oder „RM“ (Residual Marine) bezeichnet, oder mit der Abkürzung seiner englischsprachigen Bezeichnung, HFO („Heavy Fuel Oil“). Es besteht aus flüssigen Ölanteilen sowie festen Schwebstoffen und Sedimenten in Lösung.

Auf Schiffen kommen neben Schweröl auch das mittelschwere Marine Dieselöl („Marine Diesel Oil“, MDO) oder das leichtere Gasöl („Marine Gas Oil“, MGO) zum Einsatz. Von den oben aufgeführten Kraftstoffen ist Marine Dieselöl der einzige, der kein reiner sog. „Destillatkraftstoff“ ist („DM“, Distillate Marine), sondern auch Schwerölanteile enthält.

Grundsätzlich werden umso mehr Raffinationsschritte benötigt, je leichter das Endprodukt ausfällt. Jeder Raffinationsschritt verursacht wiederum Energie- und

<sup>37</sup> Quelle: ISO 8217:2017, *Fuel Standard for marine distillate fuels* und *Fuel Standard for marine residual fuels* (2017).

<sup>38</sup> Quelle: DIN-ISO 8217:2017, *Mineralölerzeugnisse – Kraft- und Brennstoffe (Klasse F) – Anforderungen an Schiffahrtsbrennstoffe* (2017).

<sup>39</sup> Quelle: Alfa Laval, *The Alfa Laval Adaptive Fuel Line BlueBook, Technical Reference Booklet – 2018 Edition* (2018).

<sup>40</sup> Quelle: Meier-Peter & Bernhardt, *Handbuch Schiffsbetriebstechnik* (2006).

Prozesskosten, sodass die Faustregel für Kraftstoffe „je leichter, desto teurer“ so gut wie immer korrekt ist. Herkömmliches Schweröl ist demzufolge der mit Abstand kostengünstigste Schiffskraftstoff, weil er schlicht übrigbleibt.

Erdöl (oder im Raffineriezusammenhang „Rohöl“) kommt in sehr vielen verschiedenen Varianten und Zusammensetzungen vor, abhängig vom Förderort oder der Art des Vorkommens (Ölquelle, Ölsand, Ölschiefer o. ä.). In allen Rohölsorten liegt Schwefel in verschiedenen Konzentrationen molekular gebunden vor, und zwar in komplexen, unregelmäßigen Molekülen (siehe Veranschaulichung Abbildung 12). Die Art, Struktur und Konzentration dieser Moleküle sowie der Gesamtschwefelgehalt eines Rohöls sind ebenfalls stark abhängig von der Ölsorte. Es ist daher nicht möglich, ein einheitliches Verfahren zu entwickeln, mit dem der (von Sorte zu Sorte auf andere Art) molekular gebundene Schwefel zuverlässig aus allen Rohölsorten herausgelöst werden könnte. Es ist lediglich möglich, bei der Refination die leichteren Bestandteile vom Grundstoff abzuscheiden (s. o.). Was übrig bleibt, also das einfache Schweröl, ist demzufolge von Natur aus schwefelhaltig.

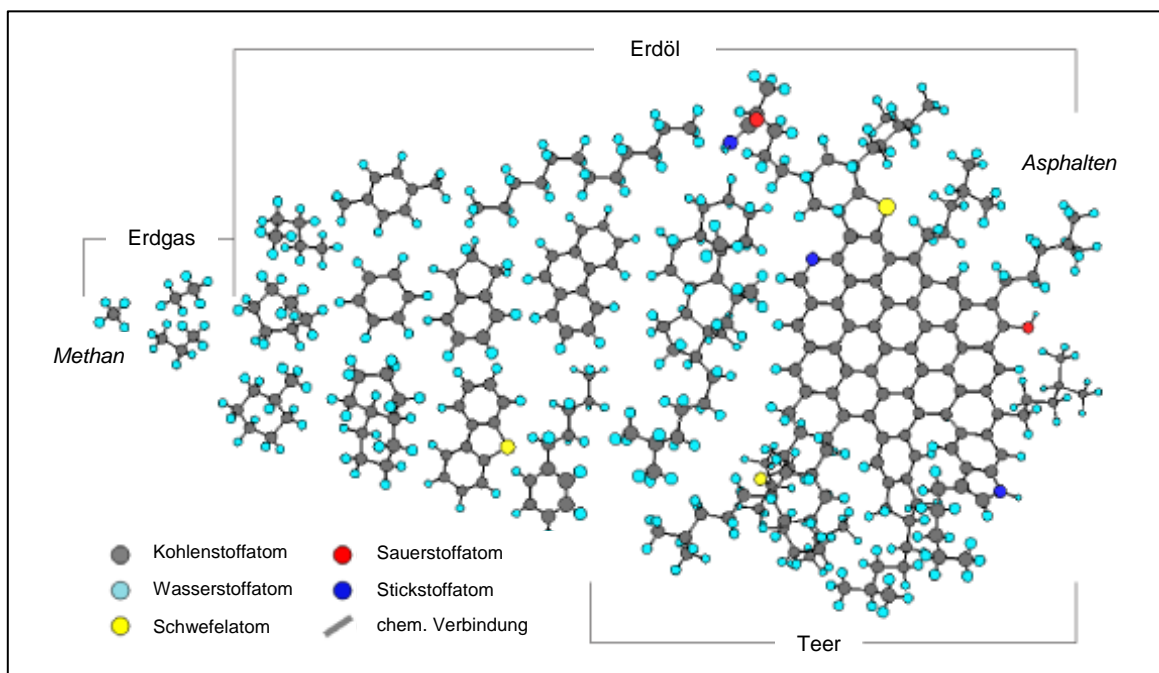


Abbildung 12: Aufbau verschiedenster Erdölmoleküle (Veranschaulichung)<sup>41</sup> u. a. mit vereinzelt Schwefelatomen (gelb)

Das Schweröl, das als Kraftstoff auf Schiffe gelangt, ist nicht nur aufgrund der Herkunft seines Grundstoffs quasi jedes Mal ein anderes, sondern auch wegen der erdölfremden oder raffinationsbedingten Bestandteile, die es zusätzlich aufweisen kann. Diese werden entweder absichtlich zur Aufbereitung beigemischt oder sind z. B. aus Prozessgründen enthalten. Mitunter kommen auch illegal zugesetzte Bestandteile wie Styrol oder Phenol (werden zur Kunststoffherstellung verwendet) oder gebrauchte

<sup>41</sup> Quelle: U. S. Geological Survey USGS, *Examples of some organic compounds in petroleum* (abgerufen 2022).

Motorenschmieröle vor<sup>42</sup>. In vorgegebenen Konzentrationen erlaubte Bestandteile können z. B. hydrierte Pflanzenöle sein, Katalysatorrückstände von bestimmten Raffinationsprozessen (sog. „cat fines“<sup>43</sup>), Fettsäuremethylester (fatty acid methyl ester, FAME<sup>43</sup>), Asche, Sedimente, Kohlenstoff, Schmierölrückstände, Natrium oder Wasser.

Ebenso unterscheiden sich Schweröle in ihren chemisch-physikalischen Eigenschaften wie Viskosität, Dichte, Flammpunkt, Zündqualität oder „Pour Point“<sup>44</sup>.

Um eine einheitliche Qualität von Schiffskraftstoffen zu gewährleisten und einen störungsfreien, durchgehenden Betrieb von Motoren und Kesselanlagen zu ermöglichen, werden die dafür notwendigen Werte bzw. Grenzwerte in der ISO-Norm ISO 8217 vorgegeben. Die dort festgelegten Standards gelten einerseits für Schweröle (müssen beheizt gelagert werden), die wiederum nach ihrer Viskosität unterteilt werden, und andererseits für Destillatkraftstoffe (müssen nicht beheizt gelagert werden).

Selbst mit den durch die ISO 8217 gewährleisteten Qualitäts-Mindeststandards muss an Bord jedoch noch ein erheblicher Aufbereitungsaufwand (Absetzen, Separation, Filtration) betrieben werden, um den Raffinerierückstand Schweröl als Kraftstoff verbrennen zu können.

### 3.2.2.2 Mischproblematik<sup>45</sup>

In allen Roh- und Schwerölen sind sog. „Asphaltene“ zu finden. Als deren schwerste Komponenten sorgen diese aromatischen Kohlenwasserstoffe<sup>46</sup> für eine hohe Viskosität der Öle und sind von schwarzer oder dunkelbrauner Farbe. In ihrer molekularen Anordnung bilden sie Kleinstpartikel, die quasi einen Kohlenstoffkern und eine Wasserstoffhülle haben (sehr stark vereinfacht!) und mit „Malten“ überzogen sind. Asphaltene besteht grob gesagt aus den unlöslichen Komponenten des Schweröls, das harzartige Malten aus den löslichen.

Wird ein Kraftstoff mit einem hohen Anteil an aromatischen Kohlenwasserstoffen mit einem Kraftstoff vermischt, der einen hohen Anteil paraffinischer Kohlenwasserstoffe<sup>47</sup> enthält, von denen mindestens eins ein Schweröl ist, kann dies dazu führen, dass die Maltenschicht der Asphalteneartikel sich zum Teil auflöst. Dies führt zu einer Polarität

---

<sup>42</sup> Quelle: Roslan Khasawneh (Reuters), *Contaminated marine fuels clog ship engines in Singapore hub – surveyor* (2018).

<sup>43</sup> „FAME sind Verbindungen aus einer Fettsäure und [...] Methanol. [...] FAME aus pflanzlichen Fetten sind bei Raumtemperatur flüssig und kommen mit einem Teil ihrer Eigenschaften [...] Dieselkraftstoff sehr nahe (deshalb auch die Bezeichnung „Biodiesel“), sind jedoch zugleich Lösungsmittel [...], was zu technischen Problemen an Dichtungsmaterialien in Motorsystemen führen kann.“, Quelle: Wikipedia, *Fettsäuremethylester* (abgerufen 2022).

<sup>44</sup> Pour point: niedrigste Temperatur, bei der ein Öl gerade noch fließfähig ist (engl. to pour = gießen), Quelle: DIN EN ISO 3015:2019 (2019).

<sup>45</sup> Quelle: Claussen, S.: *Einführung in die Betriebsstofflehre für den Schiffsbetrieb* (2003).

<sup>46</sup> aromatische Kohlenwasserstoffe („Aromate“): ringförmige Kohlenwasserstoffe mit Doppelbindungen (reaktionsfreudig).

<sup>47</sup> paraffinische Kohlenwasserstoffe: gesättigte kettenförmige Kohlenwasserstoffe (weniger reaktionsfreudig), oft in Form sehr langkettiger Paraffinwaxse.



dieser Partikel. Bei Vermischung mit einem leichten Kraftstoff verdünnt dieser zusätzlich die flüssige Ölphase des Schweröls, sodass dessen Tragfähigkeit sinkt.

Befanden die Asphaltentpartikel sich vorher einzeln und in Schwebelage in dem „stabilen“, also homogenen und fließfähigen Schweröl, ballen die polarisierten Partikel sich nun zusammen. Das Ergebnis ist, dass mindestens eine der Schweröle zerfällt in seine leichteren Komponenten einerseits und eine dicke, feste, teerartige, teilweise als „lehmartig“<sup>48</sup> beschriebene Masse (Ölschlamm, engl. „sludge“) andererseits, die sich in Tanks absetzt und Separatoren, Filter, Setz- und Tagestanks sowie Kraftstoffleitungen zusetzt. Das Schweröl ist „instabil“ geworden (siehe Abbildung 13). Im schlimmsten Fall kann dies zu einem scheinbar plötzlichen Ausfall der Antriebsmaschinenanlage führen.



Abbildung 13: Ölschlamm in Separatoren und Filtern nach Kraftstoffmischung<sup>48</sup>  
(ausgefallene Asphaltene)

Führt die Mischung zweier Schweröle zu einer derartigen Instabilität auf mindestens einer Seite, spricht man von einer „Inkompatibilität“ der beiden vorher stabilen Kraftstoffe. Ein Mischungsverhältnis zu gleichen Teilen (1:1) gilt als das kritischste mit dem größten Risiko für eine Inkompatibilität, ebenso ganz grundsätzlich die Mischung eines herkömmlichen Schweröls (reich an Aromaten) mit einem leichten Kraftstoff (reich an paraffinischen Bestandteilen).

<sup>48</sup> Quelle: Class NK, *Issues after starting to use of [sic] VLSFO* (2021). Übersetzung: BSU.

Sowohl bei der Umstellung von einem schwefelarmen auf einen schwefelhaltigen Kraftstoff (oder zurück) als auch prinzipiell beim Übergang von einer Bunkercharge<sup>49</sup> auf eine andere muss also darauf geachtet werden, dass beide Kraftstoffe so wenig wie möglich miteinander in Berührung kommen. So werden z. B. neue Bunkerchargen alten grundsätzlich nicht hinzugefügt, sondern in vorher restentleerte Tanks gefüllt. Um mit Bordmitteln festzustellen, ob zwei an verschiedenen Stellen gebunkerte Schweröle miteinander kompatibel sind, bzw. ein Destillatkraftstoff mit einem Schweröl, kann der sog. „Tüpfeltest“ (engl. „Spot Test“) durchgeführt werden. Dies ist ein vom CIMAC<sup>50</sup> standardisiertes Verfahren mit der offiziellen Bezeichnung „ASTM D4740“<sup>51</sup>, bei dem je eine kleine Menge der zwei zu mischenden Kraftstoffe im geplanten Mischungsverhältnis miteinander vermengt wird (z. B. um zu prüfen, ob bei der Umstellung zwischen zwei Kraftstoffen Inkompatibilitäten etwa im Leitungssystem auftreten könnten). Von der Mischung wird ein Tropfen auf ein spezielles Testpapier (ähnlich Filter- oder Löschpapier) gegeben, das dann in einem speziellen kleinen Ofen auf 100 °C erhitzt wird. Nach einer Stunde im Ofen wird der Tropfen auf sein Aussehen untersucht. Bei Kompatibilität der Kraftstoffe ist ein homogener Fleck entstanden, bei Inkompatibilität ein zusätzlicher innerer Ring, der auf ein Absetzen von Asphaltene hindeutet. Nach ASTM D4740 werden fünf Abstufungen bzw. Kategorien unterschieden, wie in Abbildung 14 und Tabelle 1 dargestellt.<sup>51</sup>

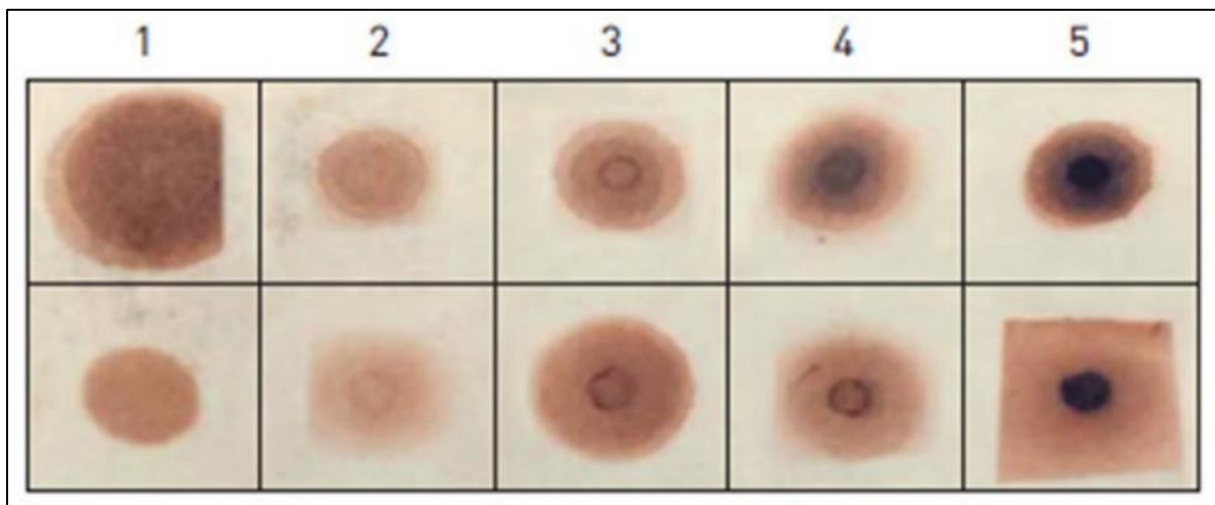


Abbildung 14: Fünfstufige Bewertung eines Tüpfeltests nach ASTM D4740  
(immer auf das Mischungsverhältnis bezogen.)

<sup>49</sup> „bunkern“: das Äquivalent zum Tanken bei Schiffen.

„Charge“: hier die bei einem einzelnen Bunkervorgang übernommene Kraftstoffmenge.

<sup>50</sup> CIMAC: Conseil International des Machines à Combustion („Internationaler Rat der Verbrennungsmotoren“). Eingetragener internationaler Verein, der als Dachverband der Großmotorenbranche auftritt.

<sup>51</sup> Quelle: CIMAC Guideline, *Marine fuel handling in connection to stability and compatibility* (2019).

Tabelle 1: Fünfstufige Bewertung eines Tüpfeltests nach ASTM D4740

1	Homogener Fleck (kein innerer Ring)	kompatibel
2	Schwacher oder kaum definierter innerer Ring	noch kompatibel
3	Gut definierter, dünner innerer Ring, nur leicht dunkler als der Hintergrund	mischen vermeiden
4	Gut definierter innerer Ring, dicker als in Fleck Nr. 3 und noch dunkler als der Hintergrund	inkompatibel
5	Sehr dunkler harter oder fast harter Fleck in der Mitte. Der innere Ring ist deutlich dunkler als der Hintergrund.	inkompatibel

Auch die Stabilität (vor allem die Alterungsstabilität) eines einzigen herkömmlichen Schweröls kann mit einem Tüpfeltest gut bestimmt werden.

### 3.2.2.3 Kraftstoffumstellung im Schiffsbetrieb

Im Tagesbetrieb kommt (am Motor oder Kessel) eine Umstellung von einem Kraftstoff auf einen anderen, wobei mindestens einer davon ein Schweröl ist, regelmäßig vor. Seit der Einführung von SECAs und der vermehrten Verwendung schwefelarmer Schweröle und/oder leichterer Kraftstoffe hat sich die Frequenz dieser Umstellungen noch einmal deutlich erhöht.<sup>52</sup> Dies gilt vor allem, seit in SECAs der Grenzwert 0,1 % vorgeschrieben ist (seit 2015).

Wird zwischen schwefelhaltigen und schwefelarmen Schwerölen umgestellt, besteht das Problem, dass schwefelhaltige Schweröle eher reich an aromatischen Kohlenwasserstoffen sind und schwefelarme eher an paraffinischen (siehe auch

<sup>52</sup> Quelle: Class NK, *Booklet for ship crew members: Precautions concerning change-over to 0.50 % sulphur compliant fuels*, Informationsbroschüre (2019).



Tabelle 2 auf S. 35). Wie in Kapitel 3.2.2.2 erläutert, erhöht diese Konstellation beim Mischen von Schwerölen die Wahrscheinlichkeit einer Inkompatibilität. Die Möglichkeit einer Inkompatibilität zweier Schweröle bestand zwar seit jeher, doch hat die Wahrscheinlichkeit mit dem Einsatz schwefelarmer Schweröle aufgrund ihrer Zusammensetzung deutlich zugenommen.

Wird zwischen einem schweren und einem leichteren Kraftstoff umgestellt, kommt deren unterschiedliche Viskosität erschwerend hinzu. Der leichte Kraftstoff darf nicht im heißeren Motor verwendet werden (dann wäre seine Viskosität zu gering), der schwere Kraftstoff nicht im kälteren (Viskosität wäre zu hoch). Eine plötzliche Temperaturumstellung führt jedoch zu thermischen Spannungen in den Bauteilen des Motors bzw. des Kessels. Die Umstellung muss also über einen längeren Zeitraum erfolgen, in dem die Betriebstemperatur langsam angepasst wird (wobei ein Temperaturgradient von  $\pm 2 \text{ K / min}$  nicht überschritten werden darf<sup>52</sup>). Dabei wird dem schweren Kraftstoff ein zunehmender Anteil leichter Kraftstoff zugesetzt (oder andersherum), um theoretisch immer die „richtige“ Viskosität für die jeweils herrschende Bauteiltemperatur zu erzielen. Bei der Umstellung auf einen leichteren Kraftstoff muss dieser am Ende ggf. sogar gekühlt werden, um die korrekte Einspritztemperatur zu erreichen. Die erwähnten Probleme bei der Mischung zweier Kraftstoffe müssen dabei natürlich berücksichtigt und idealerweise vorher ein Tüpfeltest durchgeführt werden.

Aufgrund der strukturellen Belastung durch die nie gänzlich zu vermeidenden thermischen Spannungen durch viele Umstellvorgänge (häufiges Ausdehnen und Wiederzusammenziehen, ggf. unterschiedlich stark bei benachbarten Bauteilen) können z. B. Passungen undicht werden<sup>53</sup> oder Bauteile ganz versagen<sup>54</sup>. Auch ist Schwefel ein natürlicher Schmierstoff, und dessen regelmäßiges Fehlen kann sich aufgrund der dann erhöhten Reibung z. B. durch einen schnelleren Verschleiß an Passungen und Dichtflächen bemerkbar machen.<sup>52</sup>

### 3.2.2.4 Schwefelarme Schweröle

Auch schwefelarme Schweröle und Destillatkraftstoffe müssen den Vorgaben der ISO 8217 entsprechen. In Kapitel 3.2.2.1 wurde beschrieben, dass es nicht möglich ist, herkömmlichem Schweröl einfach den Schwefel zu entziehen. Daraus ergibt sich, dass schwefelarme Schweröle auf eine andere Art und Weise hergestellt werden müssen als durch einfache Entschwefelung von Rückstandsöl. Die chemische Herstellung schwefelarmer schwerer Kraftstoffe, die sich innerhalb der Vorgaben der ISO 8217 auch wie Schweröle verhalten, ist jedoch eine Herausforderung.

#### Zusammensetzung

---

<sup>53</sup> Quelle: Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung, *Ausfall der Hauptmaschine und anschließendes Notankermanöver des Bulkcarriers CAPE LEONIDAS am 17. Januar 2017 auf der Elbe im Bereich Kolmar*, summarischer Untersuchungsbericht (2019).

<sup>54</sup> Quelle: Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung, *Brand im Maschinenraum des Passagierschiffs DEUTSCHLAND am 23. Mai 2010 um 12:30 Uhr im Hafen von Eidfjord / Norwegen*, Untersuchungsbericht (2011).

Um einen schwefelarmen, schweren Kraftstoff herzustellen, bei dem sich z. B. das Viskositäts-Temperatur-Verhältnis, der Brennwert und die Zündqualität innerhalb des geforderten Betriebsbereichs ISO-8217-konform verhalten, wird zunächst ein Grundstock schwefeligen Schweröls mit derjenigen Menge eines schwefelarmen, leichteren Kraftstoffs verschnitten, die den Schwefelgehalt auf den angestrebten Wert herabsenkt. Dann werden unter Zugabe verschiedener Zusatzstoffe wie Paraffinwachs die „schweren Eigenschaften“ des zunächst deutlich leichteren Mischkraftstoffs wiederhergestellt (sehr stark vereinfachte Darstellung!). Man könnte bei diesen Kraftstoffen daher auch von „Verschnitten“ sprechen.

Tabelle 2: Zusammensetzung klassischer und schwefelarmer Schweröle<sup>55</sup>

Zusammensetzung	HFO 3,5 % S	VLSFO 0,5 % S
Aromatische Kohlenwasserstoffe	+/- 70 %	+/- 30 %
naphthenische <sup>56</sup> und paraffinische Kohlenwasserstoffe	+/- 30 %	+/- 70 %
Anzahl der Zusammensetzungs-komponenten	2 bis 3	6 bis 8 (abh. vom Förderort)

Tabelle 2 zeigt die Zusammensetzung schwefelarmer Schweröle im Vergleich zu klassischen in Bezug auf die enthaltenen Kohlenwasserstoffe. Die schwefelarmen Schweröle enthalten einen deutlich höheren Anteil der weniger reaktiven, naphthenischen (gesättigten) Kohlenwasserstoffe – und entsprechend einen niedrigeren Anteil der reaktiveren, ungesättigten aromatischen Kohlenwasserstoffe. Außerdem bestehen sie, wie beschrieben, aus mehr Komponenten.

#### *Kompatibilität<sup>39 52</sup>*

Durch dieses Missverhältnis zwischen aromatischen Kohlenwasserstoffen bei herkömmlichen und paraffinischen Kohlenwasserstoffen bei schwefelarmen Schwerölen steigt bei deren Mischung die Wahrscheinlichkeit für das in Kapitel 3.2.2.2 beschriebene Ausfallen von Asphalten (Instabilität). Schwefelarme Kraftstoffe sind also generell schlechter kompatibel mit herkömmlichem Schweröl als klassische Schweröle untereinander. Der Einsatz schwefelarmer Kraftstoffe birgt demzufolge eine erhöhte Gefahr für die Folgen von Kraftstoffinstabilität wie Verunreinigung oder gar gänzlicher Verschluss von Separatoren, Filtern, Setz- und Tagedtanks sowie Kraftstoffleitungen.

Bei Mischungen mit schwefelarmen Schwerölen wurde zudem eine über die Zeit schneller und plötzlicher abfallende Stabilität beobachtet. Dieses Phänomen ist ein Stück weit normal und erklärt sich z. B. durch oxidative Zersetzung im Kontakt mit Luft in teilgefüllten Tanks. Ein schnellerer und vor allem ein plötzlicher Abfall der Stabilität kann jedoch dazu führen, dass es sogar nach einem unauffälligen Passieren der Aufbereitungselemente (Setztanks, Separatoren, Filter) durch die Temperaturerhöhung vor dem Einspritzen plötzlich zu einer Instabilität und dem Ausfallen von Asphalten mit den genannten Folgen kommt. Auch die Alterungsstabilität eines schwefelarmeren Schweröls hat oft eine geringere Halbwertszeit als die eines herkömmlichen Schweröls.

<sup>55</sup> Quelle: Aderco, *Fuel Competence* (abgerufen 2022).

<sup>56</sup> naphthenische Kohlenwasserstoffe („Naphtene“, Cycloalkane): gesättigte (ohne Doppelbindungen), ringförmige Kohlenwasserstoffe.

### *Kaltfließverhalten*<sup>39 52</sup>

Die Zugabe von Paraffinwachs (das den hohen Anteil paraffinischer Kohlenwasserstoffe bedingt) zu schwefelarmen, schweren Kraftstoffen, um deren Viskosität an diejenige schwerer Kraftstoffe anzugleichen, führt zu ganz eigenen Problemen. Paraffinwachs beginnt bereits ca. 15 °C oberhalb des Pour Point eines Kraftstoffs auszukristallisieren und einem leichteren Kraftstoff eine Trübung zu verleihen (also deutlich vor Erreichen des Pour Points bei Abkühlung). Diese Temperatur nennt man „Kristallisationspunkt“ (engl. „Cloud Point“; „clouding“ = Trübung). Die etwas niedrigere Temperatur, bei der ein genormter Filter gerade noch durchlässig ist für diesen trüben paraffinischen Kraftstoff, nennt man „Filtrierbarkeitsgrenze“ (engl. „Cold Filter Plugging Point“).



Abbildung 15: Mit erstarrtem Wachs dichtgesetzter Filter<sup>57</sup>

All diese Temperaturen hängen zusammen und geben einen Hinweis darauf, auf welcher Temperatur ein Kraftstoff mindestens in den Lagertanks gehalten werden muss, ohne dass sich Wachs bildet. Die ISO 8217 fordert diese Angaben jedoch nicht für Rückstandskraftstoffe, unter die die schwefelarmen Schweröle im Rahmen dieser Norm fallen, sondern lediglich für Destillatkraftstoffe. Die Lagertemperatur kann für paraffinische, schwere Kraftstoffe z. B. eine höhere sein als diejenige, die bei herkömmlichem Schweröl ausreichen würde, um dessen Viskosität oberhalb der Pumpfähigkeitsgrenze zu halten (s. o.). Mitunter muss durch Probieren herausgefunden werden, bei welcher Temperatur ein schwefelarmes Schweröl lagerfähig bleibt, ohne dass Wachs auskristallisiert, oder es wird für diese Kraftstoffe

<sup>57</sup> Quelle: CIMAC, *Guideline 01 | 2015: Cold flow properties of marine fuels* (2015).

seitens des Schiffsbetreibers oder einer Klassifikationsgesellschaft pauschal eine um einen bestimmten Betrag erhöhte Lagertemperatur empfohlen.

#### *Weitere Eigenschaften*

Paraffinwachs führt außerdem dazu, dass schwefelarme Schweröle ihre Viskosität mit steigender Temperatur auf andere Art verändern als herkömmliches Schweröl, und auch ihre Dichte ist geringer. So ist ein schwefelarmer, schwerer Kraftstoff bei sehr hohen Temperaturen oft dünnflüssiger als es herkömmliches Schweröl bei derselben Temperatur wäre und muss demzufolge mit geringerer Temperatur dem Kraftstoffkreislauf zugeführt oder eingespritzt werden. Es kann weiterhin zu erhöhten Einspritzdrücken kommen, die ggf. über das WECS angepasst werden müssen.<sup>26</sup>

Die Separationstemperatur liegt zwischen diesen beiden Polen (Erstarrungs- und Einspritztemperatur) und muss mitunter ebenfalls durch Ausprobieren herausgefunden werden. „Mindestens 15 °C oberhalb des Pour Point“ ist hierbei der Richtwert, mit dem begonnen wird.

#### *ISO/PAS 23263<sup>58</sup>*

Neben der ISO 8217 gibt es die speziell für schwefelarme, schwere Kraftstoffe geschaffene Norm ISO/PAS 23263. In dieser wird dezidiert eingegangen auf Viskosität, Kaltfließverhalten, Stabilität, Zündverhalten und Cat-Fines-Gehalt sowie allgemeine Besonderheiten dieser Kraftstoffe. Die Grenzwerte der ISO 8217 behalten dabei ihre Gültigkeit.

Die Norm erklärt weiterhin, dass künftig zusätzliche Beurteilungskriterien für die Kraftstoffqualität herangezogen werden müssen als die Viskosität, die in der Vergangenheit für die Klassifizierung ausreichte (s. o., anderer Viskositätsverlauf bei schwefelarmen Schwerölen). Ebenso wird vermutet, dass die Stabilitäts- und Kompatibilitätsprobleme schwefelarmer Kraftstoffe bestehen bleiben und sich immer weniger vorhersagen lassen werden. Deshalb empfiehlt der CIMAC für eindeutige Vorhersagen bezüglich der Kompatibilität zweier Kraftstoffe künftig Laboruntersuchungen an Land, zusätzlich zur Tüpfelprobe.<sup>51</sup>

#### **3.2.2.5 Schmierölkompatibilität**

Aufgrund des historisch relativ hohen Schwefelgehalts des verbrannten Kraftstoffs sind die dazugehörigen Zylinderschmieröle entsprechend basisch, also neutralisierend, um Korrosion an der Zylindereinheit durch Schwefelsäure zu vermeiden (Säurekorrosion / „cold corrosion“). Diese Basizität des Schmieröls wird unter Zugabe von Kalziumhydroxid  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (gelöschtem Kalk) hergestellt und mit der sog. „Basenzahl“ (total base number, TBN<sup>59</sup>) dargestellt.

---

<sup>58</sup> Quelle: ISO/PAS 23263:2019, *Petroleum products – Fuels (class F) – Considerations for fuel suppliers and users regarding marine fuel quality in view of the implementation of maximum 0,50 % sulphur in 2020* (2019).

<sup>59</sup> Die Einheit der Basenzahl ist [mg KOH/g]. Dies bedeutet, dass 1 g dieses Schmieröls dieselbe Basizität hat wie [Basenzahl] Milligramm Kaliumhydroxid KOH – auch, wenn die Basizität nicht mit KOH erreicht wurde, sondern z. B. mit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Für Schiffsdieselmotoren reichen die Werte von etwa

Das Ziel ist, das Kalziumhydroxid „aufzubrechen“, also in der Neutralisationsreaktion zu Kalziumsulfat, dem Sulfatsalz des Kalziums, umzuwandeln. Dieses Salz wird dann mit dem Schmieröl abgeführt. Wird das Kalziumhydroxid nicht aufgebraucht, können harte Kalziumrückstände auf der Lauffläche zwischen Laufbuchse und Kolben oder auf dem Kolbenboden verbleiben und zu abrasiven Schäden führen. Neben diesen Rückständen entstehen z. B. durch die Reaktion mit dem CO<sub>2</sub> im Abgas auch unerwünschte Stoffe wie Kalziumkarbonat (Kalk).

Eine regelmäßige Umstellung zwischen schwefelhaltigen Kraftstoffen im Scrubber-Betrieb auf hoher See und schwefelarmen Kraftstoffen in Reviergewässern bedeutet also, dass am Motor ein sorgfältiges Zylinderschmierölmanagement betrieben werden muss: Im Spannungsfeld zwischen Säurekorrosion wegen zu saurer Schweröle und abrasiven Schäden wegen zu basischer Schmieröle gilt es, das richtige Gleichgewicht zu finden.

Erste Unternehmen bieten bereits vollautomatische Basenzahl-Anpassungen und die dazugehörige fließende Umstellung des Schmieröls passend zum jeweils verwendeten Kraftstoff im laufenden Betrieb an.<sup>60</sup>

### 3.2.3 Containerschiff EBBA MAERSK

Bei der 2007 gebauten EBBA MAERSK handelt es sich um das fünfte von acht baugleichen Containerschiffen. Die Baureihe ist auch als sog. „E-Klasse“<sup>61</sup> oder „EMMA-MAERSK-Klasse“ bekannt. Die EMMA MAERSK galt als das erste ULCS (Ultra-Large Container Ship)<sup>62</sup>.

2016 wurden das Brückendeck aller E-Klasse-Schiffe angehoben und die Laschbrücken entsprechend erhöht, sodass die Schiffe danach eine weitere volle Lage Container (ca. 1.300 TEU) mitnehmen konnten.<sup>63</sup> Die in Kapitel 2.2 genannten Daten beziehen sich auf die erhöhte (also zum Unfallzeitpunkt aktuelle) Kapazität.

Alle Motoren (Hauptmaschine und Hilfsdiesel) sowie die Kesselanlage des Schiffs sind schwerölfähig.

Das Schiff wurde zum Unfallzeitpunkt im Linienverkehr zwischen Ostasien und Europa eingesetzt.

---

TBN 15 bis TBN 80, das Schmieröl mit der höchsten Basenzahl hat TBN 100<sup>60</sup>. Quelle: Auto Motor Öl, *Gesamtbasenzahl TBN* (abgerufen 2022).

<sup>60</sup> Quelle: LUKOIL, *iColube*<sup>®</sup> (abgerufen 2022).

<sup>61</sup> EMMA MAERSK, ESTELLE MAERSK, ELEONORA MAERSK, EVELYN MAERSK, EBBA MAERSK, ELLY MAERSK, EDITH MAERSK, EUGEN MAERSK (in Baureihenfolge).

<sup>62</sup> ULCS: ein Großcontainerschiff mit einer Containertragfähigkeit von mehr als ca. 10.000 TEU. Auch ULCV (Ultra-Large Container Vessel) oder „Großcontainerschiff“.

<sup>63</sup> Quelle: The Loadstar, *Maersk upgrades E-class containerships to bolster capacity* (2016).



### 3.2.4 Hauptmotor Wärtsilä 14RT-flex96C

#### 3.2.4.1 Der Motor

Der 14RT-flex96C ist ein langsamlaufender, langhubiger<sup>64</sup> Zweitakt-Dieselmotor („Großdiesel“) mit Common-Rail-Einspritzsteuerung, der von Wärtsilä produziert wird.

Die Zahl „14“ deutet auf die Anzahl der Zylinder des Reihenmotors hin, „flex“ bedeutet, dass der Motor eine Common-Rail-Einspritzsteuerung hat (siehe Kapitel 3.2.4.2), und „96“ ist seine Zylinderbohrung<sup>65</sup> in Zentimetern. Der Buchstabe „C“ ist Teil der Wärtsilä-Typenbezeichnungen.

Der Motor hat einen Hub von 2,5 m, eine Höhe von 13,5 m, eine Länge von 26,59 m und bis zu 80,08 MW Nennleistung. Damit gehört der 14RT-flex96C bis heute zu den leistungsstärksten und effizientesten Verbrennungsmotoren der Welt. Er wird meist mit vier Turboladern betrieben.<sup>66 67</sup>



Abbildung 16: Hyundai Wärtsilä 14RT-flex96C (Lizenzbau) beim Testlauf<sup>68</sup>  
(Menschen als Größenvergleich)

#### 3.2.4.2 RT-flex Common-Rail-Einspritzsteuerung

Im Einspritzzyklus eines Verbrennungsmotors mit Nockenwelle ist der Einspritzzeitraum im Verlauf eines Zylinderhubs statisch und unveränderlich

<sup>64</sup> „langhubig“: bezieht sich auf einen Verbrennungsmotor, dessen Hub größer ist als seine Bohrung.

<sup>65</sup> „Bohrung“ oder „Zylinderbohrung“: Innendurchmesser der Zylinderlaufbuchsen eines Verbrennungsmotors.

<sup>66</sup> Quelle: Wärtsilä Services Switzerland Ltd., *Wärtsilä RT-flex96C and Wärtsilä RTA96C Technology Review*, Prospekt (2008).

<sup>67</sup> Quelle: Wärtsilä Services Switzerland Ltd., *The world's most powerful engine enters service* (2006).

<sup>68</sup> Quelle: Hyundai Heavy Industries, *World's Most Powerful Marine Engine Runs Successful Trial*, Bericht über den Motortestlauf am 29.05.2007 (2007).

positioniert. Jeder Zylinder hat eine eigene Einspritzpumpe mit Nockenstößel, der wie ein Schalter den Einspritzvorgang auslöst. Der Einspritzverlauf ist über die Geometrie der Nocken vorgegeben. Dasselbe gilt für die ebenfalls über die Nockenwelle angesteuerten Auslassventile, deren Steuerzeiten (Öffnungszeiten und -zeiträume) ebenso starr von der Nockengeometrie vorgegeben sind.

Bei einem Common-Rail-Motor gibt es diese Bauteile nicht: keine Nockenwelle, keine Einspritzpumpe, keine Stößel. Der Einspritzdruck von ca. 700 bar (bei einigen Modellen bis 1.000 bar) liegt durchgehend in einer gemeinsamen („common“) Leitung („rail“) an, die am gesamten Motor entlangläuft. Die Einspritzung für jeden Zylinder wird hierbei jeweils über eine vom WECS elektronisch gesteuerte Einspritzregelungseinheit („injection control unit“, ICU) geregelt, in der ebenfalls Einspritzdruck herrscht (siehe auch das nachfolgende Kapitel 3.2.4.3). Dieser Druck wird durchgehend von bis zu acht Hochdruckpumpen gehalten.

Auch die Steuerzeiten der Auslassventile bzw. der Ladungswechsel<sup>69</sup> werden elektronisch gesteuert.

Es verlaufen diverse Leitungen entlang der Pumpenseite (= eine der Längsseiten) des Motors, u. a. die folgenden:

- die beschriebene Kraftstoffleitung, der „Common Rail“ (700 bar),
- eine Leitung für Steueröl (Schmieröl, 200 bar), mit dem die Auslassventile im Zylinderkopf und die Magnetventile der ICU angesteuert (also gegen eine Feder geöffnet) werden,
- eine Leitung für Anlassluft (30 bar),
- eine Rücklaufleitung für Kraftstoff.

Das Automatisierungs-, Regelungs- und Alarmsystem des Motors und seiner Hilfssysteme bei Wärtsilä, mit dem auch die Einspritzung elektronisch geregelt wird, nennt sich „WECS“ (Wärtsilä Engine Control System).

---

<sup>69</sup> Ladungs- oder Gaswechsel: das Einbringen frischer Verbrennungsluft in den Brennraum eines Zylinders einer Verbrennungskraftmaschine, bei gleichzeitiger Entfernung der Abgase. Bei Vier- und Zweitaktmotoren bewirkt dies die Kolbenbewegung, ggf. erhöhen Turbolader und/oder Gebläse den Druck der einströmenden Luft (Ladeluft).



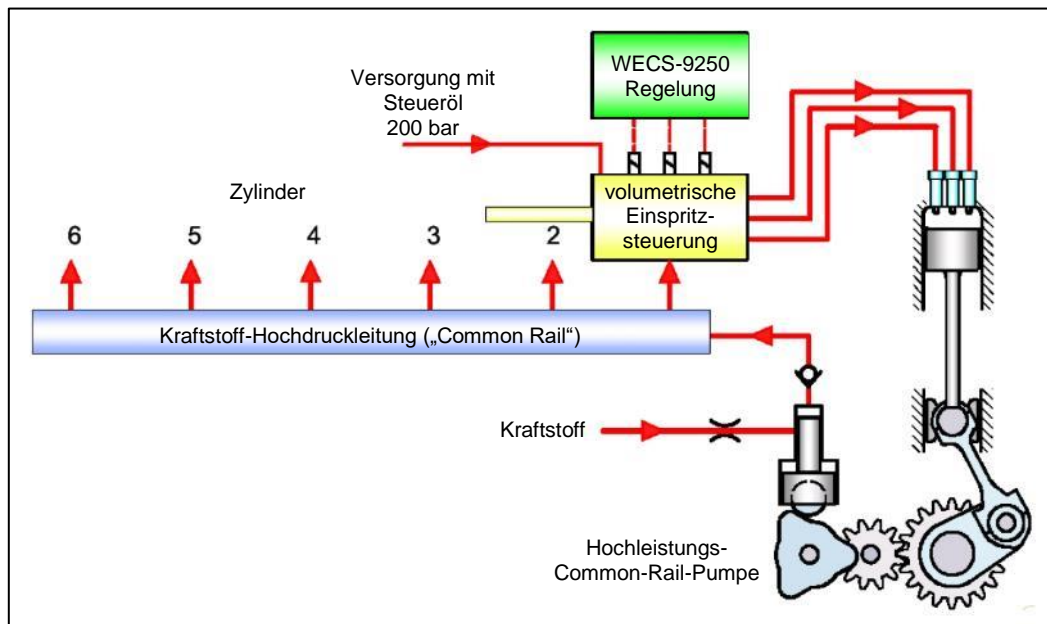


Abbildung 17: Schematische Darstellung des Common-Rail-Prinzips<sup>70</sup>

### 3.2.4.3 Einspritzregelungseinheit ICU

Jeder Zylinder verfügt über eine eigene elektronische Einspritzregelungseinheit ICU (die „volumetrische Einspritzsteuerung“ in Abbildung 17). Sie bestimmt das Einspritzprofil wie im vorangegangenen Kapitel 3.2.4.2 beschrieben.

<sup>70</sup> Quelle: Wärtsilä Sea and Land Academy, *RT-flex Control Elements* (2009). Übersetzung: BSU.

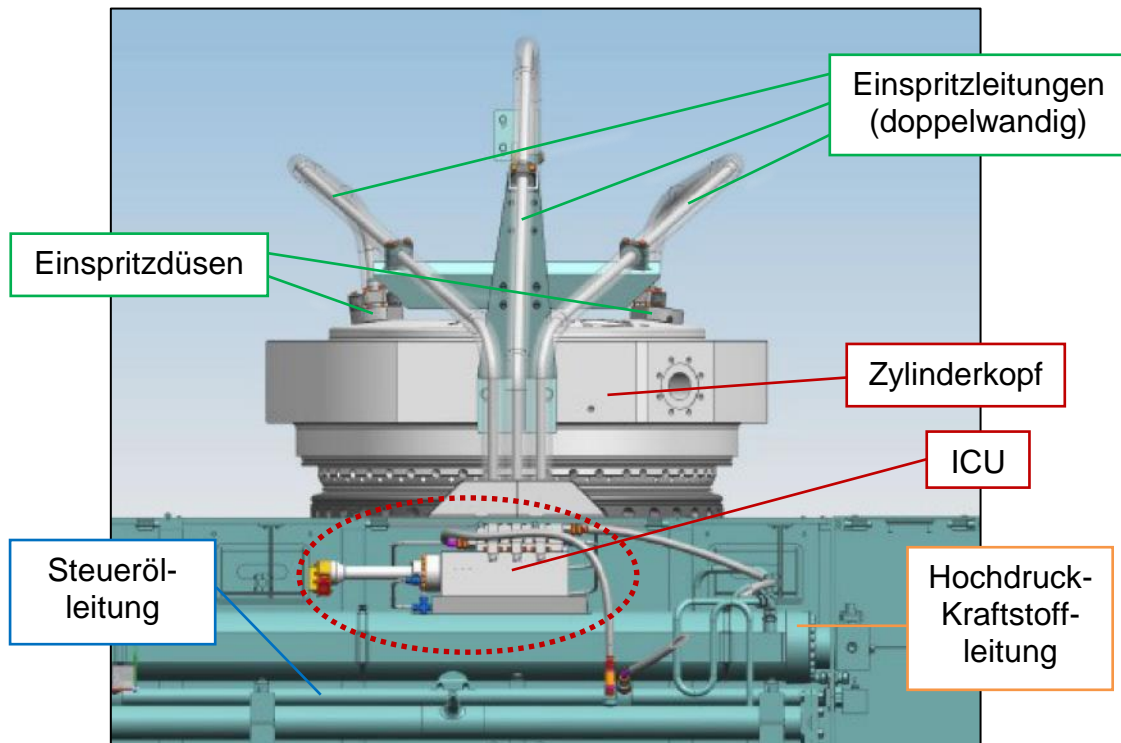


Abbildung 18: ICU vor Zylinderkopf, Einspritzleitungen<sup>71</sup>

Bei der folgenden Funktionsbeschreibung wird sich auf die ICUs der 2003 entwickelten ersten Generation beschränkt, die zum Unfallzeitpunkt auf der EBBA MAERSK in Verwendung waren. Es hat seitdem Weiterentwicklungen gegeben, doch die Funktionalität ist im Prinzip dieselbe geblieben.

Jede ICU hat einen Eingang über die Kraftstoff-Hochdruckleitung und drei<sup>72</sup> Ausgänge über die drei sog. „Einspritzsteuerventile“ („injection control valves“ ICV) in die Einspritzleitungen. Diese drei Leitungen führen zu den drei Einspritzdüsen des Zylinders (siehe Abbildung 18). Die Einspritzsteuerventile werden von den sog. „rail valves“ (Magnetventilen) angesteuert (siehe Abbildung 19).

<sup>71</sup> Quelle: Wärtsilä Services Switzerland Ltd., *Upgrading of Wärtsilä FuelFlex Injection Control Unit enables reliable operation with low-sulphur fuels*, Presseerklärung (2020).

<sup>72</sup> Es gibt auch zweizügige Ausführungen, mit zwei Magnetventilen, zwei Einspritzsteuerventilen pro ICU und zwei Einspritzdüsen am Zylinder.

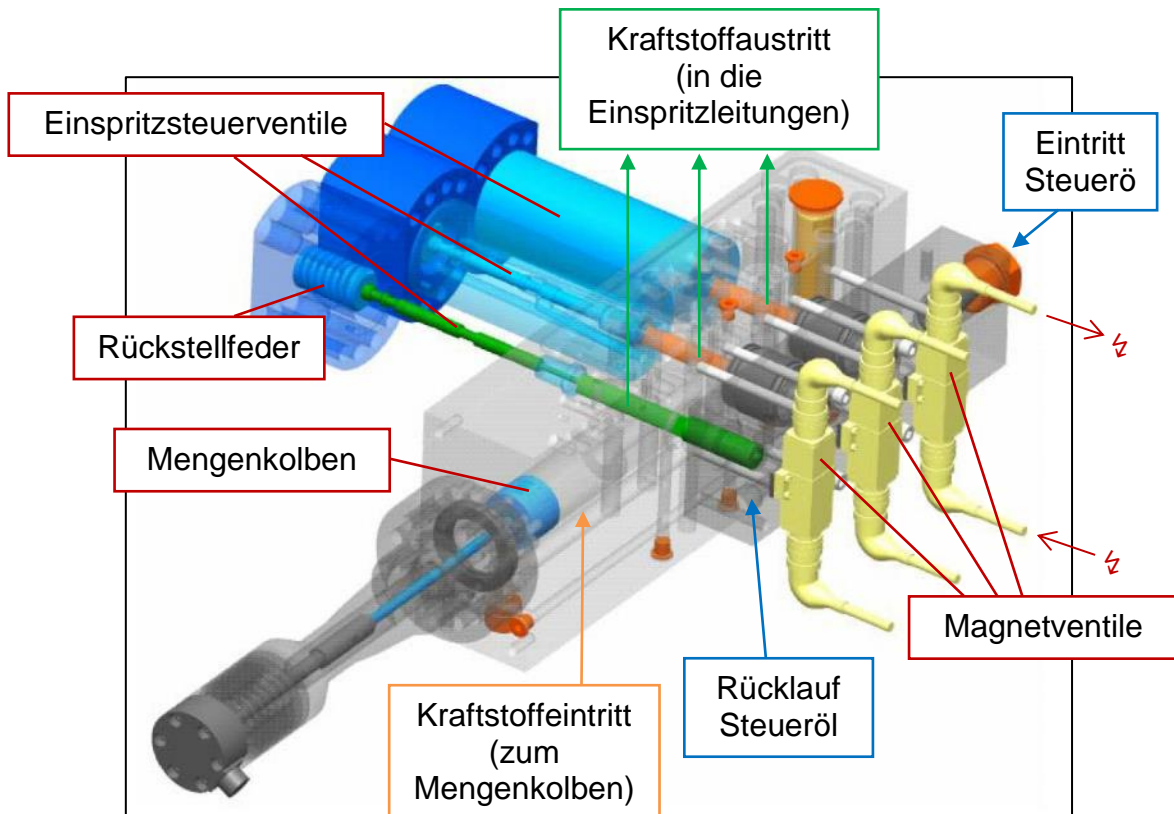


Abbildung 19: 3D-Darstellung einer ICU<sup>73</sup>

Die Magnetventile werden ihrerseits elektronisch über das WECS aktiviert und steuern den Fluss des Steueröls (blau), das dann die federbelasteten Einspritzsteuerventile hydraulisch öffnet und schließt. Die Einspritzsteuerventile bekommen den Kraftstoff (orange) mit bis zu 700 bar vom Mengenkolben (engl. „fuel quantity piston“, wörtl. „Kraftstoffmengenkolben“) und fördern ihn weiter (grün) in die Einspritzleitungen und an die Einspritzdüsen im Zylinder. Jeweils ein Einspritzsteuerventil aktiviert dabei eine Einspritzdüse.

Grundsätzlich gilt: Wird ein Magnetventil angesteuert, wird über das dazugehörige Einspritzventil eingespritzt. Ohne Ansteuerung keine Einspritzung.

Der Mengenkolben fährt im Betrieb nie in die Endposition, um immer eine Reserve vorzuhalten. Volllast des Motors entspricht einem Hub des Mengenkolbens von 80 %.

<sup>73</sup> Quelle: Wärtsilä Sea and Land Academy, *RT-flex Control Elements* (2009). Beschriftung: BSU.



Abbildung 20: Foto einer ICU<sup>74</sup>  
 (Während des Einbaus;  
 verschiedene Anschlüsse noch mit gelben Plastikkappen bedeckt.)

Im Folgenden wird ein Einspritzzyklus einer ICU mithilfe eines hydraulischen Schaltplans genauer beschrieben.

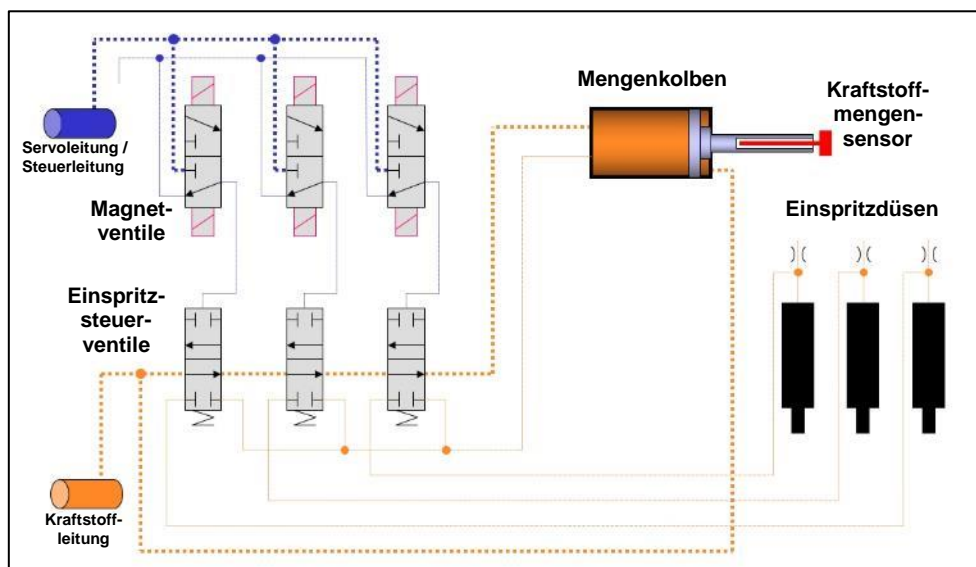


Abbildung 21: Wirkprinzip ICU: Ruhezustand

Im Ruhezustand sind die Einspritzsteuerventile für den Querfluss von Kraftstoff (orange) geöffnet. Der Mengenkolben wird von beiden Seiten mit Kraftstoff unter 700 bar Druck beaufschlagt. Durch die Kolbenstange auf der Rückseite ist die Beaufschlagungsfläche dort geringer, sodass der Flächendruck auf den Kolben auf

<sup>74</sup> Quelle: Abbildung 20 bis Abbildung 27: Wärtsilä Sea and Land Academy, *RT-flex Control Elements* (2009).

der Vorderseite größer ist. So wird er im Ruhezustand in die hintere Endlage geschoben und füllt sich mit Kraftstoff. Die Magnetventile befinden sich ebenfalls im Ruhezustand und blockieren den Fluss des Steueröls (blau). (Abbildung 21)

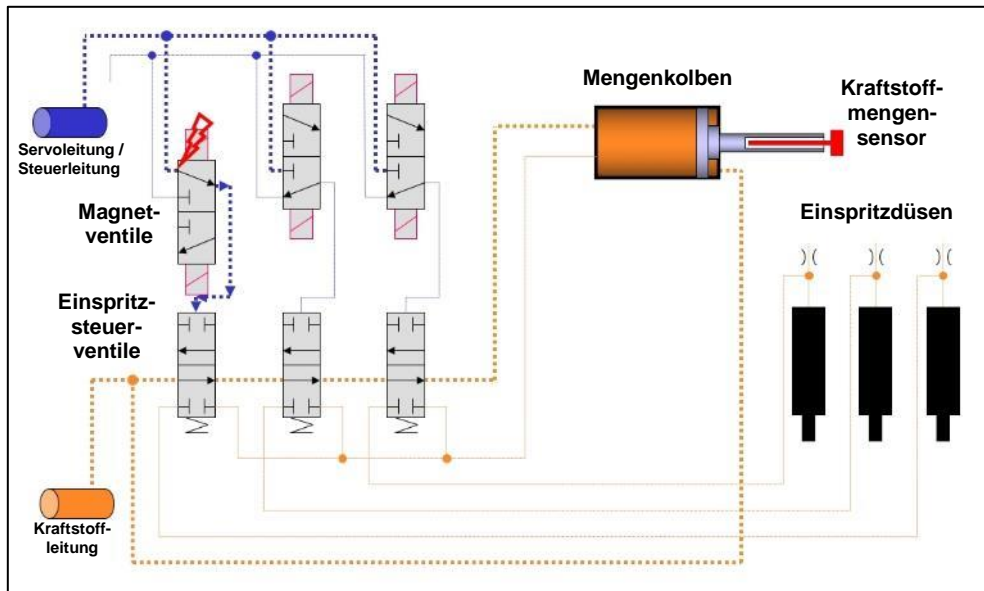


Abbildung 22: Wirkprinzip ICU: Magnetventil wird vom WECS aktiviert

Ein Magnetventil wird über das WECS elektronisch aktiviert. Dabei öffnet es den Durchflusskanal für das Steueröl (blau), das beginnt, hydraulischen Druck auf das dazugehörige Einspritzsteuerventil auszuüben. (Abbildung 22)

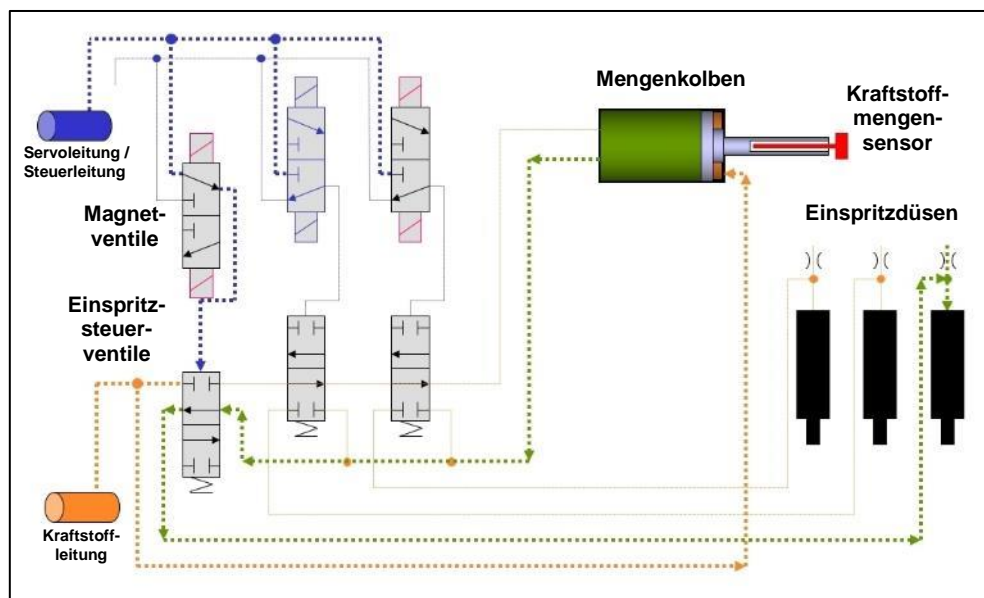


Abbildung 23: Wirkprinzip ICU: Steueröl aktiviert Mengenkolben

Durch das Steueröl (blau) wird das Einspritzsteuerventil hydraulisch geöffnet, also gegen seine Rückstellfeder in die offene Position gedrückt. Es schließt dabei den Kanal, mit der die Vorderseite des gefüllten Mengenkolbens mit Kraftstoff beaufschlagt wird. Die Beaufschlagung der Rückseite bleibt immer bestehen (orange). Der Kanal



zwischen dem Kolben und der Einspritzleitung (grün) wird gleichzeitig geöffnet. (Abbildung 23)

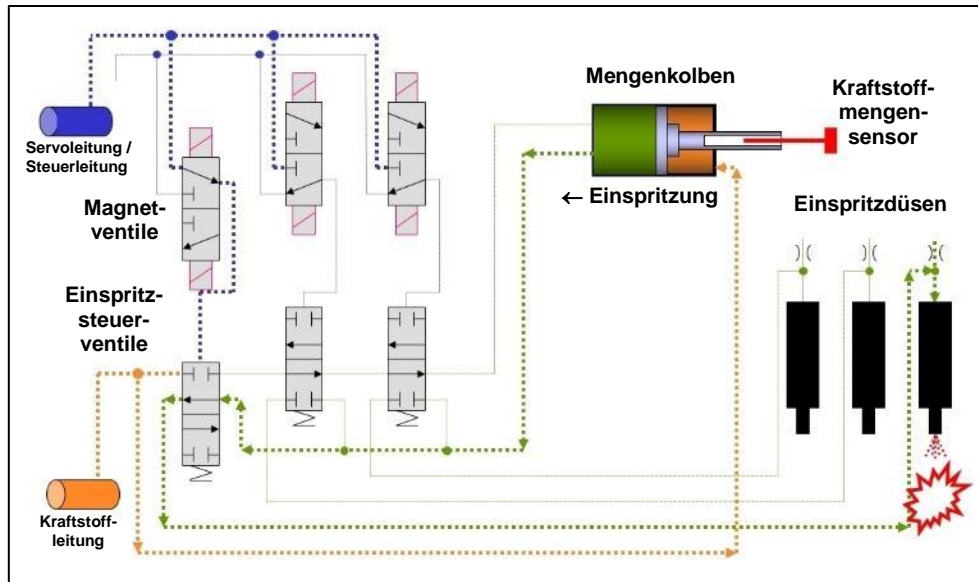


Abbildung 24: Wirkprinzip ICU: Kraftstoff wird eingespritzt

Durch die veränderte Druckdifferenz zwischen Vor- und Rückseite des Mengenkolbens (nun herrscht höherer Druck auf der Rückseite) bewegt er sich in die vordere Endlage und entleert sich dabei in die Einspritzleitung (grün). Es kommt zur Einspritzung, sobald an der Einspritzdüse 700 bar erreicht sind und das Nadelelement öffnet. (Abbildung 24)

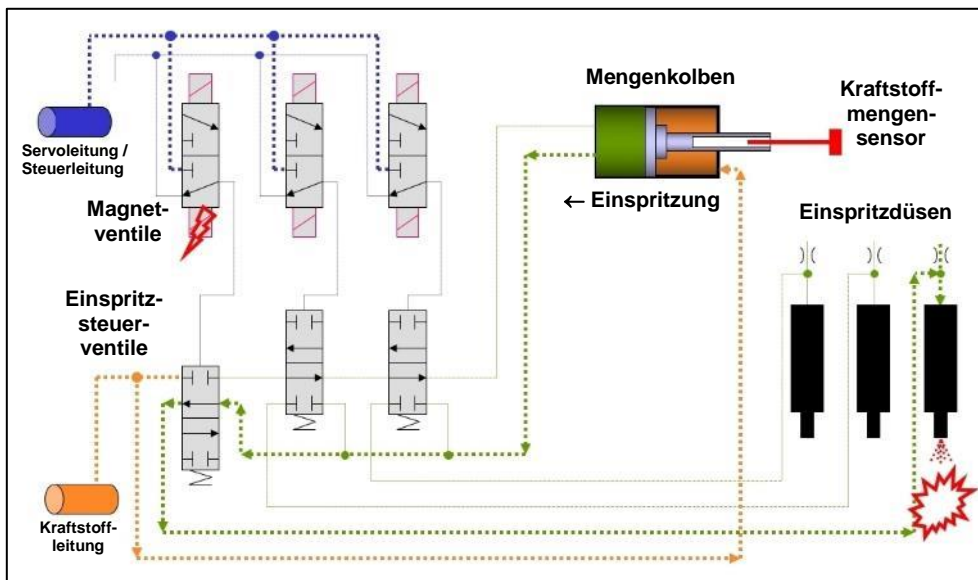


Abbildung 25: Wirkprinzip ICU: Magnetventil geht in die Ausgangsposition

Noch bevor der Einspritzvorgang beendet ist, wird das Magnetventil vom WECS wieder in seine ursprüngliche Position zurückbewegt, und es schließt für das Steueröl (blau). (Abbildung 25)



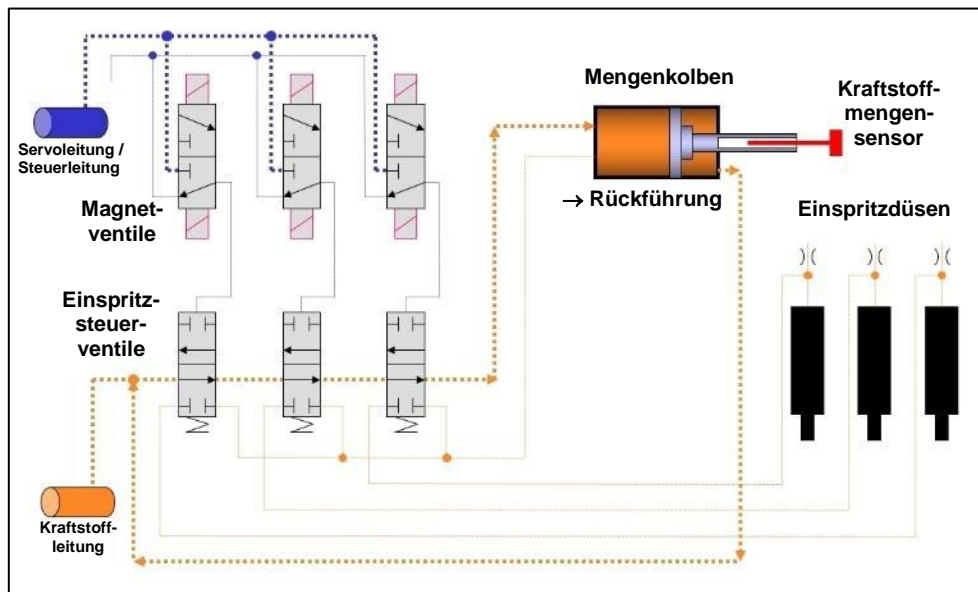


Abbildung 26: Wirkprinzip ICU: Mengenkolben füllt sich wieder

Ohne den hydraulischen Druck des Steueröls (blau) wird das Einspritzsteuerventil von seiner Rückstellfeder ebenfalls wieder in seine ursprüngliche Position gebracht. Der Kanal, mit dem die Vorderseite des Mengenkolbens über den Kraftstoff-Querfluss mit 700 bar Druck beaufschlagt wird (orange), wird dadurch wieder geöffnet. Der Kolben bewegt sich wie eingangs beschrieben in die ursprüngliche, hintere Endlage zurück und befüllt sich dabei erneut. Die Kraftstoffzufuhr zur Einspritzdüse ist unterbrochen, die Einspritzung beendet. (Abbildung 26)

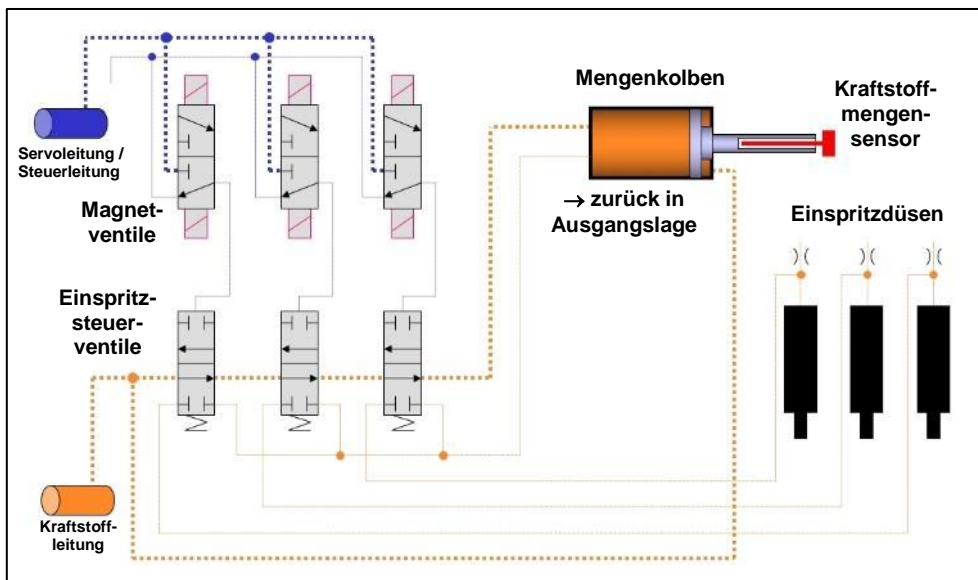


Abbildung 27: Wirkprinzip ICU: Ruhezustand

Die ICU befindet sich nun wieder in Ruhelage (Abbildung 27). Meist findet der beschriebene Vorgang zeitgleich für alle drei Einspritzventile (und alle drei Magnetventile und alle drei Einspritzsteuerventile) gleichzeitig statt. Bei Teillast können auch nur zwei oder, wie in den vorangegangenen Abbildungen, nur ein Einspritzventil angesteuert werden.

Der Weg, den der Kolben bei einer Einspritzung zurücklegt, ist proportional zum eingespritzten Kraftstoffvolumen. Dieses wird an das WECS zurückgemeldet. Über eine Veränderung der Kolbenendlage kann die Einspritzmenge angepasst werden.

#### **3.2.4.4 Leckströme in der ICU**

Bei sehr hohen Drücken und/oder Temperaturen, wie sie im Bereich der Kraftstoffeinspritzung und der ICU herrschen, wird eine Dichtigkeit mithilfe exakt gearbeiteter Metall-auf-Metall-Passungen sowie einem minimalen Leckstrom des transportierten Betriebsstoffs durch den Spalt hergestellt (und nicht mit Gummidichtungen o. ä.). Dies bedeutet, dass die kleinen Spalte in der ICU, die für eine Bewegung zweier Bauteile gegeneinander benötigt werden, durch geringe Mengen durchfließenden Kraftstoffs oder Steueröls dichtgehalten werden. Diese Leckrate ist gewollt und normal. Der Kraftstoff z. B. wird dabei über Leckleitungen in einen füllstandsüberwachten Lecktank („leakage tank“) abgeführt und schließlich wieder dem Kraftstoffkreislauf zugesetzt.

Schwache Leckströme in Richtung der Einspritzdüse aufgrund eines nicht mehr ganz dichten Einspritzsteuerventils (durchgehender Kraftstoff-Querfluss, s. o.) können über eine dazugehörige Leckleitung nahe der Düse abgeführt werden. Wird dieser Kraftstofffluss zu stark, funktioniert das Abführen jedoch nicht mehr. Der Kraftstoff ist irgendwann in der Lage, das Nadelelement der Einspritzdüse auch außerhalb der regulären Einspritzzeiten anzuheben, sodass es zu einer unkontrollierten Einspritzung in den Brennraum des betreffenden Zylinders kommen kann.

Laut Wärtsilä Technical Bulletin RT-82<sup>75</sup> seien die kraftstoffseitigen Spalte in der ICU für den HFO-Betrieb (also mit Schweröl) ausgelegt. Im kontinuierlichen MGO-Betrieb sei die Leckrate an diesen Stellen etwa um das Fünffache erhöht, während der Umstellung von HFO auf MGO aufgrund der nicht vollständig zu vermeidenden erhöhten Bauteiltemperatur kurzzeitig sogar um das Zehnfache.

Auch der natürliche Bauteilverschleiß erhöhe die Leckrate über die Jahre (ggf. verstärkt durch die in Kapitel 3.2.2.4 bereits erwähnte geringere Schmierfähigkeit der schwefelarmen Kraftstoffe, die zu erhöhter Reibung führen kann). Hier gebe es einen gewissen Teufelskreis: je stärker der Bauteilverschleiß, desto größer die Leckrate – die ihrerseits jedoch auch den Bauteilverschleiß erhöht, da ein Flüssigkeitsstrom immer auch einen geringfügigen Materialabtrag bzw. Auswaschungen bedeutet und zu Effekten wie Kavitation<sup>76</sup> führen kann.

An die hydraulische Beaufschlagungsfläche der Einspritzsteuerventile durch das Steueröl grenzt ein sog. „neutraler Raum“ an. Es handelt sich dabei um einen Raum,

---

<sup>75</sup> Quelle: Wärtsilä Services Switzerland Ltd., *Technical Bulletin RT-82: Operation on distillate fuels* (2015).

<sup>76</sup> Kavitation bezeichnet die Bildung von Dampfblasen in einer Flüssigkeit, wenn der lokale Druck schnell unter den Dampfdruck der Flüssigkeit sinkt (z. B. durch eine plötzliche lokale Erhöhung der Fließgeschwindigkeit). Diese Dampfblasen bleiben in der Regel nur kurze Zeit bestehen, bevor sie wieder in die flüssige Phase kollabieren. Dabei ist ein knallendes Geräusch zu hören, und es werden hohe Druck- und Temperaturspitzen erreicht, die imstande sind, Oberflächen in der Nähe zu beschädigen. Kleine Krater im Bereich von Propellerflunkenspitzen sind z. B. typische Kavitationserscheinungen.

der nur dazu dient, Platz vorzuhalten für die Bewegung der Ventile, und normalerweise nicht mit Flüssigkeit gefüllt ist. Über die angrenzenden Dichtflächen kann es jedoch eine geringe, ungewollte Leckrate von Steueröl (also Schmieröl) in den neutralen Raum geben (Abbildung 28, blau eingezeichnet), die laut WinGD unter normalen Umständen aber „gut hinnehmbar“ sei.

Ebenfalls findet bei verschlissenen (also vergrößerten) Dichtspalten durch die Sitze (also Führungen) der sog. „Ventilschieber“<sup>77</sup> eine gewisse Leckage von Kraftstoff in die neutralen Räume hinein statt (grün eingezeichnet, Leckstrom 1). Diese ist gewollt und gewünscht, weil der Kraftstoff schmiert und kühlt (selbst bei den herrschenden Kraftstofftemperaturen). Es kann zu Ablagerungen kommen, wenn Steueröl hier auf deutlich heißeren Kraftstoff trifft und thermisch zersetzt wird, vor allem, wenn der für die Abfuhr der Leckagen vorgesehene Ablauf verstopft ist.<sup>78</sup>

Ebenfalls von den Schiebersitzen aus gibt es bei Undichtigkeit einen ungewollten Kraftstoffleckstrom in den sog. „Federraum“ hinein, in dem die Rückstellfeder sich befindet (Leckstrom 2). Ein weiterer ungewollter Leckstrom liegt in diesem Fall im Bereich der „Querströmung“ vor, die vom Mengenkolben kommend in Richtung Einspritzventil geht (Leckstrom 3, siehe auch Abbildung 21 bis Abbildung 27). Diese Leckage ist offenbar „im hohen Maße viskositätsabhängig“, also bei der Verwendung leichter Kraftstoffe besonders stark erhöht, und kann die Einspritzventile erreichen.<sup>78</sup>

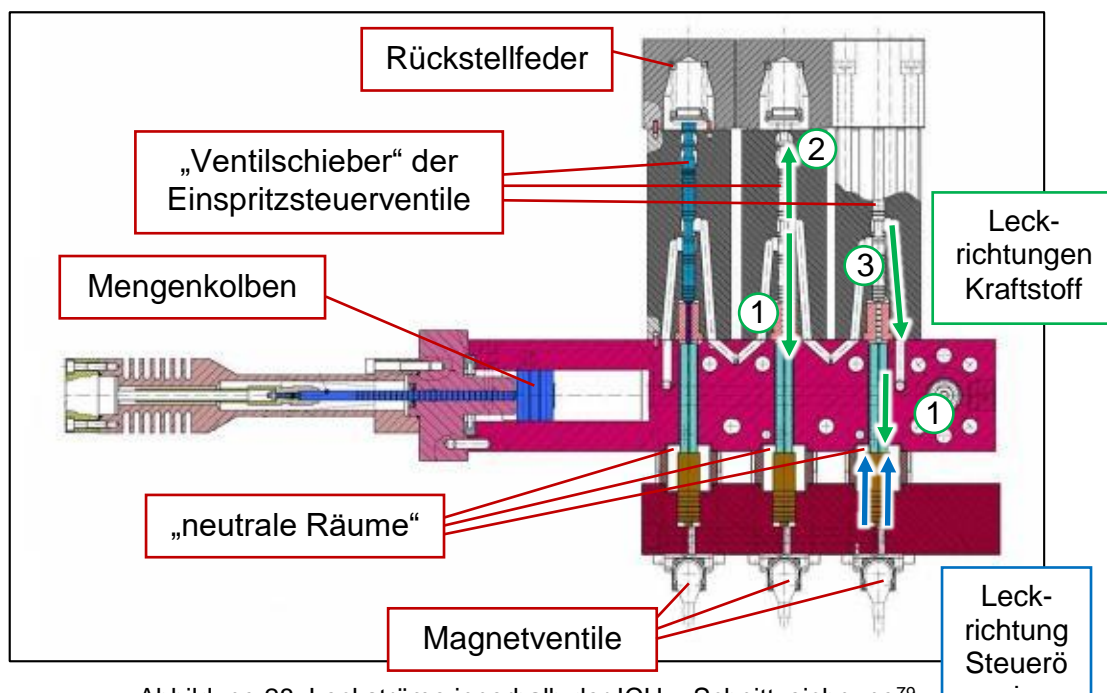


Abbildung 28: Leckströme innerhalb der ICU – Schnitzzeichnung<sup>79</sup>

<sup>77</sup> Die „Ventilschieber“ der Einspritzsteuerventile sind die in Abbildung 28 senkrecht eingezeichneten „Stangen“, die von den Magnetventilen gegen die Rückstellfeder bewegt werden und dabei Kraftstoff-Durchflussöffnungen freigeben oder verschließen.

<sup>78</sup> Quelle: Grote, N. (WinGD), E-Mail-Verkehr (2020) und Videokonferenz (2023).

<sup>79</sup> Quelle: Wärtsilä Sea and Land Academy, *RT-flex Control Elements* (Bildausschnitt) (2009).

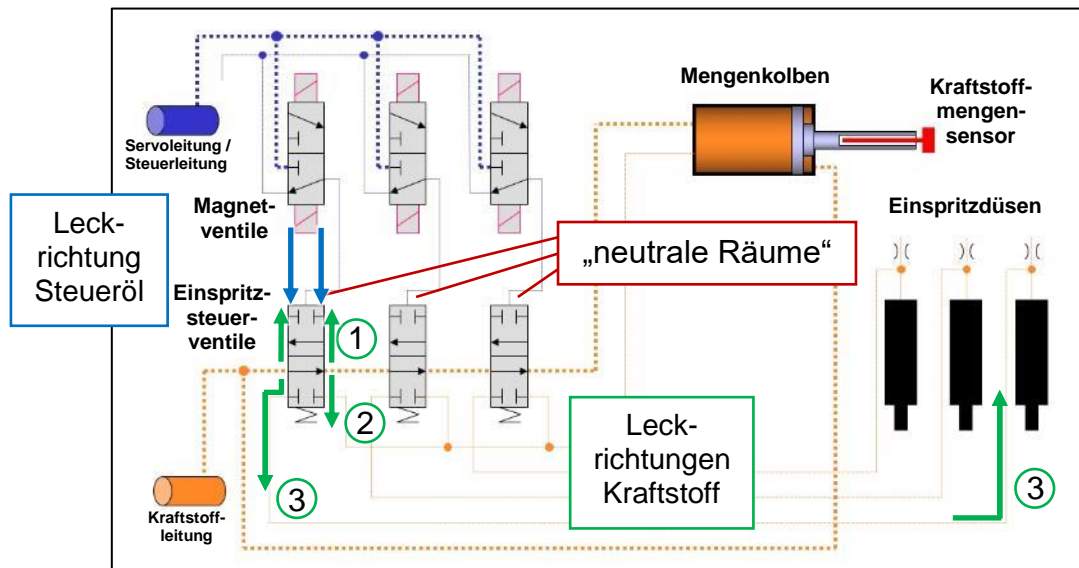


Abbildung 29: Leckströme innerhalb der ICU – Hydraulikschaubild

### 3.2.4.5 Wärtsilä Technical Bulletins

Neben dem bereits erwähnten Technical Bulletin RT-82 gibt es eine Reihe weiterer Bulletins, die Wärtsilä an seine Kunden richtete und sich mit dem Thema der Auswirkungen der Kraftstoff-Schwefelbegrenzung auf den Motorenbetrieb befassen. Wie das im Jahr 2015 verfasste RT-82 zeigt, machte vieles sich bereits vor 2020 bemerkbar. In einigen Fällen, wie bei der erhöhten Leckrate im Betrieb mit leichteren Kraftstoffen, handelt es sich um ganz grundsätzliche, auch vorher bekannte Phänomene. Als es mit der Absenkung des SECA-Schwefelgrenzwertes von 1 % auf 0,1 % im Jahr 2015 (siehe Abbildung 10 auf S. 24) deutlich öfter notwendig wurde, auf schwefelarme, also oft leichte Kraftstoffe umzustellen, begannen diese Phänomene jedoch, deutlich öfter aufzutreten.

Technical Bulletin RT-82 weist konkret darauf hin, dass es bei ICUs zu erhöhten Kraftstoffleckagen kommen kann und empfiehlt, die am stärksten betroffenen Einheiten zu identifizieren und ggf. früher als empfohlen zu überholen oder ganz auszutauschen.<sup>75</sup> Technical Bulletin RT-123 von 2016 gibt für RT-flex-Motoren mit einer Bohrung von 84 bzw. 96 cm (Letzteres trifft auf die EBBA MAERSK zu), deren ICUs noch zur ersten, vor 2010 produzierten Generation gehören (trifft ebenfalls zu), eine um ein Drittel reduzierte „Lebensdauer“ für die ICUs an (24.000 statt 36.000 Betriebsstunden).<sup>80</sup>

Technical Bulletin RT-126 von 2018 trifft die grundsätzliche Aussage, dass der Betrieb mit ULSFO unter der vollen Verantwortung des Betreibers der Maschinenanlage geschieht.<sup>81</sup>

<sup>80</sup> Quelle: Wärtsilä Services Switzerland Ltd., *Wärtsilä Technical Bulletin RT-123: Inspection and overhaul intervals* (2016).

<sup>81</sup> Quelle: Wärtsilä Services Switzerland Ltd., *Wärtsilä Technical Bulletin RT-126: Diesel Engine Fuels* (2018).

Das 2019 erschienene Technical Bulletin RT-229 liefert grundsätzliche Hinweise für den Betrieb von Zweitakt-Großdieseln mit schwefelarmen Kraftstoffen.<sup>82</sup> So sei es seit 2015 aufgrund des vermehrten Umstellens zwischen schweren und leichten Kraftstoffen zu einem erhöhten Verschleiß der Einspritzsteuerventile der ICUs gekommen. Ab einer Leckmenge Kraftstoffs von 200 ml/min werde eine ICU als verschlissen angenommen. Im lang anhaltenden Betrieb mit leichten Kraftstoffen könne es zu vorzeitig verschlissenen Ventilsitzen (also Dichtflächen, s. o.) der Einspritzsteuerventile kommen (siehe Abbildung 30), was bei den großen RT-flex-Modellen wie dem RT-flex96C wiederum zu erhöhten Abgastemperaturen führen könne.

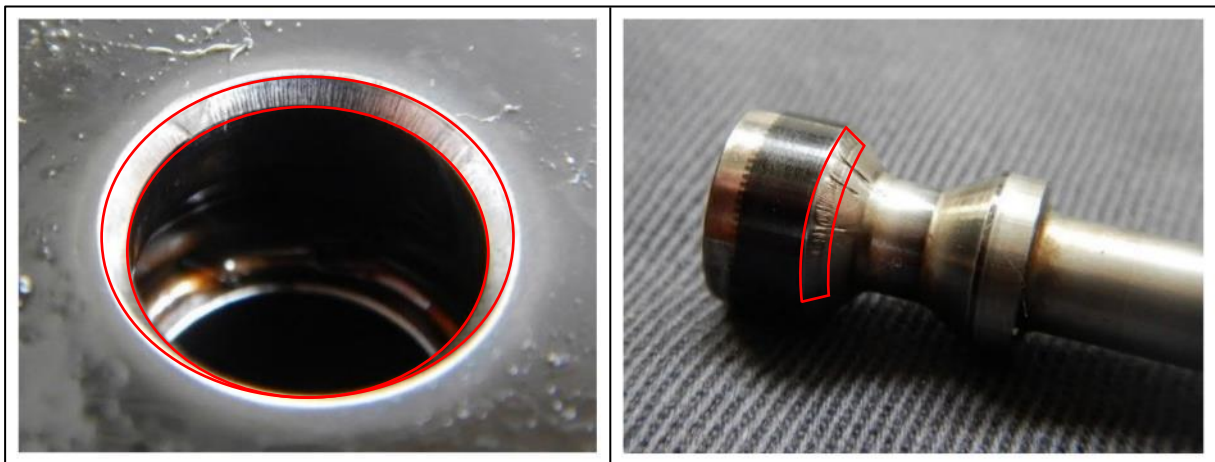


Abbildung 30: Verschleißspuren (z. B. Rillen) an Ventilsitz und -schieber eines Einspritzsteuerventils einer ICU eines RT-flex Großdiesels (Dichtflächen rot markiert)<sup>82</sup>

Dies sei darin begründet, dass auch, wenn die betroffene ICU nicht angesteuert werde, Kraftstoff in geringen, aber stetigen Mengen durch undichte Dichtflächen in Richtung Einspritzdüse transportiert und dort ggf. unkontrolliert (oder sogar durchgehend) eingespritzt werde (siehe Kapitel 3.2.4.4).

Dieser Effekt sei schon vorher bekannt gewesen, jedoch nur sporadisch aufgetreten, und zwar bei im HFO-Betrieb bis an die Grenzen des Wartungsintervalls und darüber hinaus verwendeten ICUs. Heute, als Begleiterscheinung der erhöhten Umstellfrequenz auf leichtere Kraftstoffe, trete es deutlich öfter auf. Auch in diesem Bulletin wird daher für ICUs der ersten Generation die Verringerung des Wartungsintervalls um ein Drittel empfohlen.

Es wird weiterhin auf mehrere Möglichkeiten der Nachrüstung für Komponenten der Elemente des Einspritzsystems verwiesen, u. a. die ICU. Hinterher seien diese Elemente besser geeignet für den häufigen Betrieb mit leichteren Kraftstoffen. Auch auf das korrekte Schmierölmanagement im Falle vieler Umstellvorgänge zwischen schwefeligem und schwefelarmem Kraftstoff wird hingewiesen (wie in Kapitel 3.2.2.5 erläutert).

<sup>82</sup> Quelle: Wärtsilä Services Switzerland Ltd., *Wärtsilä Technical Bulletin RT-229: Operation Guidance to the global Sulphur Cap 2020* (2019).

Es fiel auf, dass Technical Bulletins RT-82 und RT-229 lediglich eine Empfehlung zur Verringerung des Wartungsintervalls der ICUs von 36.000 auf 24.000 Stunden aussprechen, während RT-123 konkret eine geschätzte Lebensdauer („estimated lifetime“) von 24.000 Betriebsstunden („running hours“) nennt, ohne Empfehlungscharakter. Hier wird sich auf die ICUs der ersten Generation (hergestellt vor 2010) bezogen, die noch nicht „remanufactured“ wurden, also modernisiert bzw. entsprechend aufgearbeitet.

Es wird angenommen, dass der Begriff „Lebensdauer“ in dieser Publikation falsch ist oder aus älteren Versionen übernommen wurde, da mit der Bezeichnung z. B. ein „Condition Based Maintenance“<sup>83</sup> von vornherein ausgeschlossen wird. Auch hier wird also von einem Empfehlungswert ausgegangen.

Die ICUs der betroffenen Zylinder 4, 5, 10 und 11 an Bord der EBBA MAERSK hatten am Unfalltag 26.312 Betriebsstunden<sup>84</sup>.

### **3.2.5 Weitere Untersuchungen**

#### **3.2.5.1 Kraftstoffumstellvorgang**

Die Berechnung der Umstelldauer von HFO auf VLSCO erfolgte mit einer einfachen aber effektiven Excel-Kalkulationstabelle, die außerdem den Text der dazugehörigen ISM-Verfahrensanleitung enthielt, siehe Abbildung 31. Hier werden die Schwefelgehalte der beiden Kraftstoffe eingegeben (und optional auch deren Kosten – zur Berechnung der durch die Umstellung ggf. entstehenden Mehrkosten – in US-Dollar pro Tonne). Unter Berücksichtigung der thermischen Notwendigkeiten wird daraus die Umstelldauer (und optional die Mehrausgaben) errechnet.

---

<sup>83</sup> „Condition-Based Maintenance“ ist eine Instandhaltungsstrategie, bei der der tatsächliche Zustand einer Anlage überwacht wird, um zu entscheiden, welche Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden müssen, statt nach starren Zeitintervallen vorzugehen.



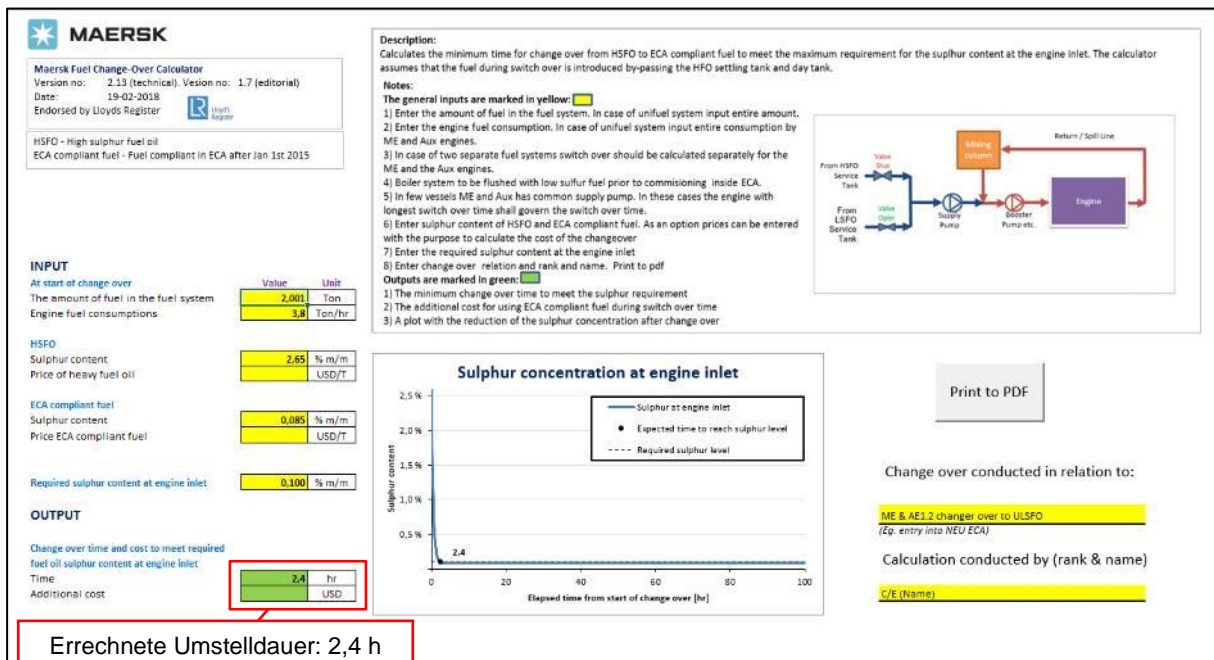


Abbildung 31: Kalkulationstabelle der EBBA MAERSK für Kraftstoffumstellung<sup>84</sup>

Die errechnete Umstelldauer von 2,4 h (2 Stunden 24 Minuten, siehe Abbildung 31) wurde am Unfalltag eingehalten, sogar ein wenig überschritten, was in diesem Fall vorteilhaft ist (siehe Unfallhergang, Kapitel 3.1.1: Beginn des Umstellvorgangs ca. 01:50 Uhr, Ende 03:27 Uhr, entspricht 2 Stunden 37 Minuten, also 2,62 h).

### 3.2.5.2 Condition Based Maintenance<sup>85 86 87</sup>

Unter dem englischen Begriff „Condition Based Maintenance“ (CBM), deutsch etwa „zustandsbezogene Instandhaltung“, versteht man eine Wartungsstrategie, bei der ein Bauteil erst dann ausgetauscht oder überholt wird, wenn es seinen maximalen noch sicheren Verschleißgrad erreicht hat, und nicht nach einer starren und immer gleichen Anzahl an Betriebsstunden.

Für ein Condition Based Maintenance verschiedener Elemente der RT-flex-Maschinen besteht ein Abkommen zwischen Wärtsilä und A. P. Møller-Mærsk A/S (APMM). In einem sog. „Letter of no objection“ (LONO) bescheinigt Wärtsilä APMM, keine Einwände zu haben gegenüber einer Verlängerung der „time between overhauls“ der ICUs und anderer Komponenten des Einspritzsystems, sofern die folgenden Bedingungen eingehalten werden:

- regelmäßige Überprüfung des gesamten Kraftstoffsystems (Vorgehen gem. Checkliste, die der BSU nicht zur Verfügung gestellt wurde);

<sup>84</sup> Quelle: Leiter der Maschinenanlage der EBBA MAERSK, *Maersk Fuel Changeover Calculator* (ausgedruckt am Unfalltag, 29.07.2020).

<sup>85</sup> Quelle: Wärtsilä Services Switzerland Ltd., *Letter of No Objection (LONO) for TBO Extension of Flex Components on APMM Fleet* (2015).

<sup>86</sup> Quelle: Wärtsilä Services Switzerland Ltd., *Flex Agreement, Appendix 3* (2015).

<sup>87</sup> Quelle: Wärtsilä Services Switzerland Ltd., *Maintenance scheme RTFlex96 Injection Control Unit (ICU)* (2018).

- durchgehende Überwachung der Leckraten der ICUs im Normalbetrieb (also Schwerölbetrieb): oberhalb einer festgelegten stündlichen Leckrate muss eine ICU verstärkt überwacht werden; oberhalb einer festgelegten, höheren Leckrate gilt sie als verschlissen und muss überholt oder ausgetauscht werden;
- Berücksichtigung des Betriebsprofils der Hauptmaschine, indem hohe Lastbereiche schwerer gewichtet werden bei der Beurteilung, nach wie vielen Betriebsstunden ein Bauteil spätestens ausgetauscht werden soll, und niedrige Lastbereiche weniger schwer (viel Zeit im Teillastbereich bedeutet weniger gefahrene Lastwechsel und somit eine höhere Betriebsstundenzahl, bevor derselbe Grad des Verschleißes erreicht ist wie nach kürzerer Zeit im Volllastbereich).

Treten bei der Überprüfung des Brennstoffsystems keine Auffälligkeiten zutage, ist es zulässig, bei Erreichung der ursprünglich zulässigen maximal 36.000 Betriebsstunden das Überholen einer ICU um 6.000 Stunden zu verschieben.

Hier wird also nicht von den in den Bulletins auf 24.000 reduzierten Betriebsstunden als Minimum ausgegangen, sondern – mit Genehmigung durch Wärtsilä unter den genannten Voraussetzungen – mit 36.000 Betriebsstunden gerechnet, die bis auf maximal 42.000 Stunden ausgeweitet werden dürfen. Laut einem von Maersk zur Verfügung gestellten Papier fuhr die EBBA MAERSK zwischen den Jahren 2015 und 2017 z. B. mit einem mittleren Lastprofil, auf dessen Basis eine Ausweitung der maximal zulässigen Betriebsstunden der ICUs auf 39.000 gestattet ist.

Eine Überwachung der Leckraten findet unabhängig davon durchgehend statt.

Für dieses LONO ist WinGD die Rechtsnachfolgerin von Wärtsilä.

### **3.2.5.3 Laboranalysen**

Bereits kurz vor Beendigung des Umstellvorgangs kam es zu Problemen im Einspritzsystem. Diejenigen ICUs, von denen das Feuer im Spülluftkanal mutmaßlich ausging, waren an einer Stelle mit einer teerartigen Masse dichtgesetzt. Diese Punkte sprachen für eine mögliche Beteiligung einer Kraftstoffunverträglichkeit bzw. -inkompatibilität am Unfallgeschehen, sodass dieser Möglichkeit nachgegangen wurde, sowohl von Maersk als auch von der BSU.

Nach dem Unfall ließ die Reederei in Antwerpen (Belgien) durch das Kraftstoff-Testlabor von Veritas Petroleum Services<sup>88</sup> in Brüssel (Belgien) eine Analyse der an der Umstellung beteiligten beiden Kraftstoffe durchführen. Auch nach der Bunkerung dieser Kraftstoffe waren bereits routinemäßige Laboranalysen durchgeführt worden.

Zuletzt ließ auch die BSU die bei der Begehung entnommenen Kraftstoffproben sowie die Probe der teerartigen Substanz umfassend durch das Kraftstofflabor der

---

<sup>88</sup> Veritas Petroleum Services BV (VPS), 1981 von DNV in Oslo etabliertes, mittlerweile unabhängiges Unternehmen, das auf die Analyse von Schiffskraftstoffen und die dazugehörige Beratung spezialisiert ist. Quelle: VPS BV, *About* (abgerufen 2022).

Technischen Universität Hamburg (TUHH) analysieren. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Folgenden gegenübergestellt.

#### a) Herkömmliche Laboranalysen

##### *Schweröl*

Das schwefelhaltige Schweröl wurde am 05./06.02.2020 in Hamburg gebunkert.

Am 14.05. wurde in Antwerpen eine Probe davon zur Analyse an das o. g. Brüsseler Labor gegeben. Der Entnahmepunkt war am Bunkermanifold<sup>89</sup> an Deck. Es hatte einen Schwefelgehalt von 2,42 %. Auch seine sonstigen Werte lagen im vorgeschriebenen Rahmen, lediglich Dichte und Viskosität waren etwas zu hoch, während die Zündqualität etwas zu niedrig war. Es wurden Cat Fines im Kraftstoff nachgewiesen. Für den Betrieb wurde empfohlen, im Parallelbetrieb zweier Separatoren den Anteil der Cat Fines um mindestens 67 % zu reduzieren, wobei die erhöhte Kraftstoffdichte die Separation erschweren könnte (ein großer Dichteunterschied zu Wasser ist hier eigentlich wünschenswert). Um die verminderte Zündqualität zu kompensieren, wurde empfohlen, Teillast zu vermeiden und mit höheren Ladelufttemperaturen zu arbeiten.

Nach dem Unfall wurde eine Probe derselben Bunkercharge am 08.08.2020 erneut an dasselbe Labor gegeben. Der Entnahmepunkt war diesmal am Tagestank (also hinter den Separatoren). Die Werte hatten sich kaum verändert, nur der Anteil der Cat Fines war um etwa ein Drittel (nicht, wie gewünscht, um zwei Drittel) reduziert, von 42 auf 30 mg/kg.

Das Kraftstofflabor der TUHH führte einen automatisierten, also sehr exakten und reproduzierbaren Tüpfeltest des Schweröls durch. Dieser ergab, dass das Schweröl stabil war (siehe Abbildung 32).

---

<sup>89</sup> „Manifold“: Schlauchanschlussstation für den Umschlag von Bunkergut, bei Tankern von flüssiger Ladung, ins Schiff.

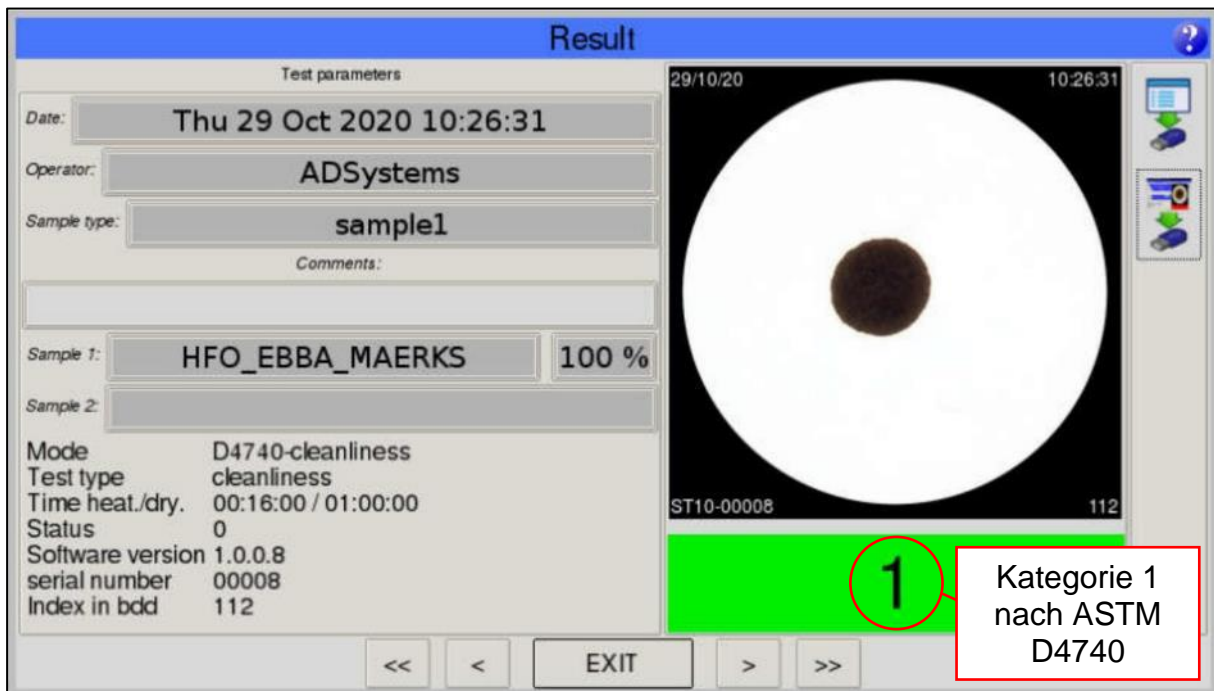


Abbildung 32: Tüpfeltest des vor der Umstellung verwendeten HFO<sup>90</sup>

### Gasöl

Das schwefelarme Gasöl wurde am 04.07.2020 in Tanjung Pelepas (Malaysia) gebunkert.

Eine Probe davon wurde nach dem Bunkern an dasselbe Labor übersandt, wo es am 08.07. eintraf. Der Entnahmepunkt war am Bunkermanifold an Deck. Die Analyse führte keinerlei Auffälligkeiten zutage. Der Schwefelanteil lag mit 0,093 % im vorgeschriebenen Rahmen.

Nach dem Unfall wurde eine Probe derselben Charge ebenfalls am 08.08. in dem Labor untersucht. Auch diesmal war der Entnahmepunkt am Tagestank. Die Werte hatten sich nur in zwei Punkten auffällig verändert: Das Gasöl war nun nicht mehr hell und klar, sondern dunkel und eingetrübt. Dazu passend war der „Micro Carbon Residue“ MCR (etwa „Rückstände mikroskopisch kleiner Kohlenstoffpartikel“) mehr als dreimal so hoch wie laut Maersk-Spezifikation DMA01 erlaubt, und fast zehnmal so hoch wie noch beim Bunkern.

Es ist laut Analyselabor denkbar, dass der leichte Kraftstoff in einem Tank (vielleicht dem Tagestank, aus dem er entnommen wurde) gelagert wurde, in dem sich vorher ein schwerer Kraftstoff befunden hatte. Auf den Schwefelgehalt, der im Rahmen geblieben war, hatte dies offenbar keinen Einfluss.

<sup>90</sup> Quelle Abbildung 32 und Abbildung 33: Dr. rer. nat. J. Bullermann, Kraftstofflabor Technische Universität Hamburg, Arbeitsgruppe Schiffsmaschinenbau (2020).

Zur Erläuterung der Kategorien nach ASTM D4740 siehe Abbildung 14 und Tabelle 1 auf S. 32.

### Mischung beider Kraftstoffe

Im Kraftstofflabor der TUHH wurde ein weiterer automatisierter Tüpfeltest durchgeführt, diesmal wurden beide Kraftstoffe im Verhältnis 1:1 miteinander vermischt. Der Test ergab, dass das Gemisch stabil, die beiden Kraftstoffe also miteinander kompatibel waren (siehe Abbildung 33). Die eventuelle Lagerung des Gasöls in einem vorher für Schweröl verwendeten Tank hatte demzufolge keinen Einfluss auf seine Stabilität.

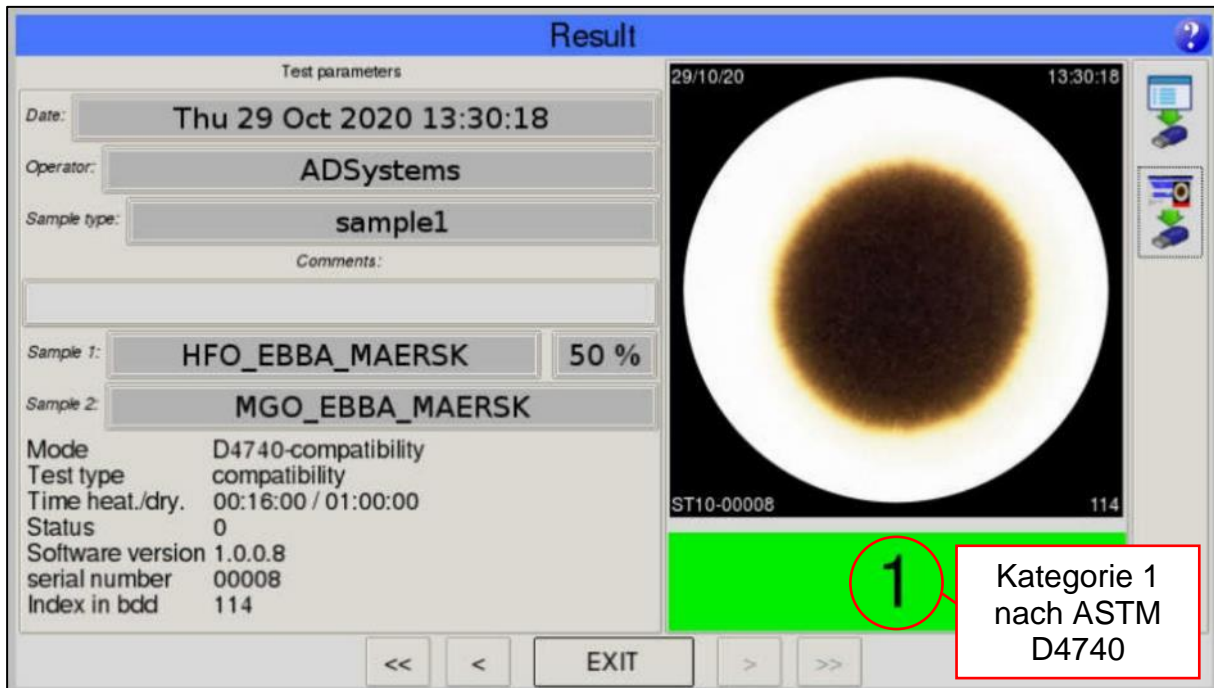


Abbildung 33: Tüpfeltest der beiden an der Umstellung beteiligten Kraftstoffe

### ULSFO

Die BSU entnahm bei ihrer Begehung auch eine Probe des schwefelarmen Schweröls (ULSFO), das zuletzt in Verwendung gewesen war. Auch hier zeigte der Tüpfeltest mit Kategorie 1 eine Stabilität des Kraftstoffs (keine Abbildung).

### b) Weitergehende Analysen durch das Kraftstofflabor der TUHH<sup>91</sup>

Die Untersuchungen des kommerziellen Labors prüfen ausschließlich auf Eigenschaften und Bestandteile, die von ISO 8217 abgedeckt sind. Das Kraftstofflabor der TUHH hingegen ist in der Lage, auch weiterführende Methoden anzuwenden, um z. B. Fremdkomponenten zu identifizieren, die zusätzlich – ggf. illegal – in den Kraftstoffen enthalten sein könnten.

<sup>91</sup> Quelle: Dr. Bullermann, J., *Analysenbericht Unfall EBBA MAERSK* (2021).

Für diesen Unfall wurde durch Dr. Jasmin Bullermann, Leiterin des Kraftstofflabors der TUHH, einerseits eine Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF)<sup>92</sup> durchgeführt und andererseits eine ATR-Infrarotspektroskopie<sup>93</sup>. Da das Labor sich direkt nach dem Unfall noch im Aufbau befand, wurden diese Analysen im Juli 2021 durchgeführt.

Keiner der Kraftstoffe zeigte bei den Messungen Auffälligkeiten, alle ermittelten Bestandteile befanden sich innerhalb des durch ISO 8217 vorgegebenen Rahmens. Die herkömmlichen Laboranalysen konnten für die Kraftstoffe also qualitativ bestätigt werden. Fremdkomponenten wurden nicht gefunden.

Die teerartige Ablagerung allerdings wies mehrere Auffälligkeiten auf. Neben einem auffälligen Aussehen (enthielt auch feste Brocken, siehe Abbildung 34) zeigte sich bei der XRF-Messung das Vorhandensein bzw. auffällig hohe Werte von Phosphor, Molybdän, Zink, Eisen und Kalzium. Zudem entsprach der Vanadiumwert dem des Schweröls, ebenso war der Schwefelgehalt erhöht (jeweils siehe Tabelle 3).



Abbildung 34: Teerartiger Rückstand  
in der Wiegeschale des Kraftstofflabors der TUHH

Diese Resultate lassen laut Dr. Bullermann die folgenden Rückschlüsse zu:

- Phosphor, Molybdän, Zink, Eisen und Kalzium lassen eine Kontamination mit Schmieröl vermuten.
- Der Vanadium- und der Schwefelwert lassen vermuten, dass auch herkömmliches Schweröl in der Probe enthalten ist.

---

<sup>92</sup> Die Röntgenfluoreszenzanalyse ist eine Methode zur qualitativen und quantitativen Bestimmung der elementaren Zusammensetzung einer Probe mithilfe von Röntgenstrahlung. (Sehr stark vereinfacht.)

<sup>93</sup> Bei der Infrarotspektroskopie wird mithilfe infraroter Strahlung eine quantitative Bestimmung von in einer Probe enthaltenen Substanzen durchgeführt. Bei der ATR-Infrarotspektroskopie (engl. attenuated total reflection, „abgeschwächte Totalreflexion“) werden dazu Rückschlüsse aus der Reflexionsfähigkeit des jeweiligen Stoffs gezogen. (Sehr stark vereinfacht.)



Um die Werte zu bestätigen, wurde die Messung wiederholt. Dies führte im Rahmen der Messtoleranzen dieses Verfahrens zu denselben Ergebnissen.

Tabelle 3: Ergebnisse der XRF-Messungen

Element	Rückstand	HFO	MGO	ULSFO	Rückstand Wdh.
	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
<b>P</b>	2.125,00				2.218,00
<b>Mo</b>	71,90				83,20
<b>Zn</b>	9.337,00				9.753,00
<b>Ni</b>	25,40	43,20		31,20	13,00
<b>Fe</b>	130,70	18,40		12,40	187,70
<b>Mn</b>	18,40				21,40
<b>V</b>	147,00	149,60			120,00
<b>Ba</b>	36,60	16,50			43,60
<b>Ca</b>	48.062,00			48,50	62.130,00
<b>Si</b>	42,40	11,40	9,30	0,10	38,10
<b>Al</b>	28,30	9,10	10,20	10,40	20,10
<b>S</b>	1,38	2,37	0,06	0,09	1,36

Bei der Aufnahme des ATR-Spektrums zeigte sich ein zunächst unbekannter Peak bei  $875\text{ cm}^{-1}$ , der sich nach einem umfassenden Bibliotheksvergleich als Kalziumkarbonat herausstellte. Dies passte zu den auffällig hohen Kalziumwerten der XRF-Messungen.

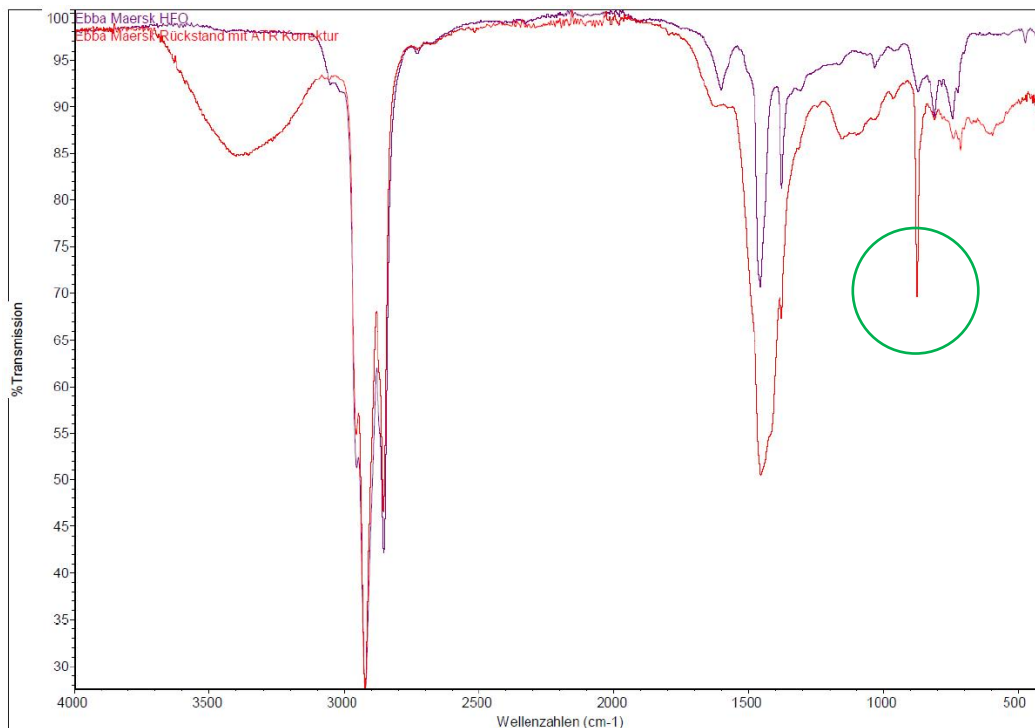


Abbildung 35: ATR-Spektrum der teerartigen Ablagerung (Kalziumkarbonat-Bande markiert)

Dr. Bullermann ließ sich Schmieröl von der EBBA MAERSK nachliefern. In diesem ließen sich jedoch keine Kalziumbestandteile nachweisen.

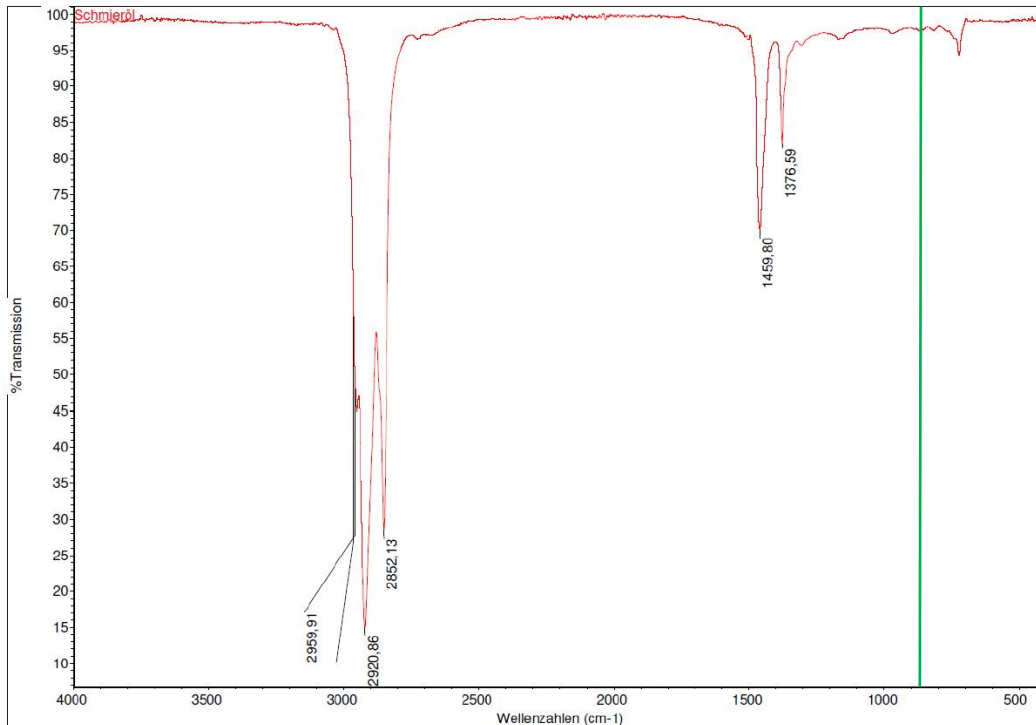


Abbildung 36: ATR-Spektrum des nachgelieferten Schmieröls  
(875 cm<sup>-1</sup> eingezeichnet)

### 3.2.5.4 Bachelorarbeit<sup>94</sup>

In Zusammenarbeit mit der Hochschule Flensburg wurde kurz nach dem Unfall ein Student des Studiengangs „Schiffstechnik“, Schwerpunkt „Schiffsbetriebstechnik“, damit beauftragt, die mögliche Ursache für den Brand im Spülluftkanal zu erforschen. Im Rahmen der Erstellung seiner Bachelorthesis führte dieser eine Schadensanalyse nach VDI 3822<sup>95</sup> durch (der entsprechenden Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure, VDI).

Die Ergebnisse der Arbeit sind maßgeblich in die Erstellung dieses Untersuchungsberichts eingeflossen und lieferten an mehreren Stellen entscheidende Impulse.

Nach einer detaillierten Beschreibung des Schadens stellte er zwei Schadenshypothesen auf: Zum einen ist er der Möglichkeit der Inkompatibilität der Kraftstoffe als Schadensursache nachgegangen, zum anderen der Frage, ob eine Fehlfunktion der betroffenen ICUs zu dem Feuer geführt haben könnte.

Zu beiden Hypothesen wurden eingehende Recherchen durchgeführt. Letztendlich kam er zu dem Ergebnis, dass in diesem Fall eine Kraftstoffunverträglichkeit ausgeschlossen werden könne und das Problem eines der ICUs gewesen sein müsse.

<sup>94</sup> Quelle: Koeplin, E. L., *Schadensanalyse nach VDI 3822 – Brand in einem Spülluftkanal* (Bachelorthesis) (2020).

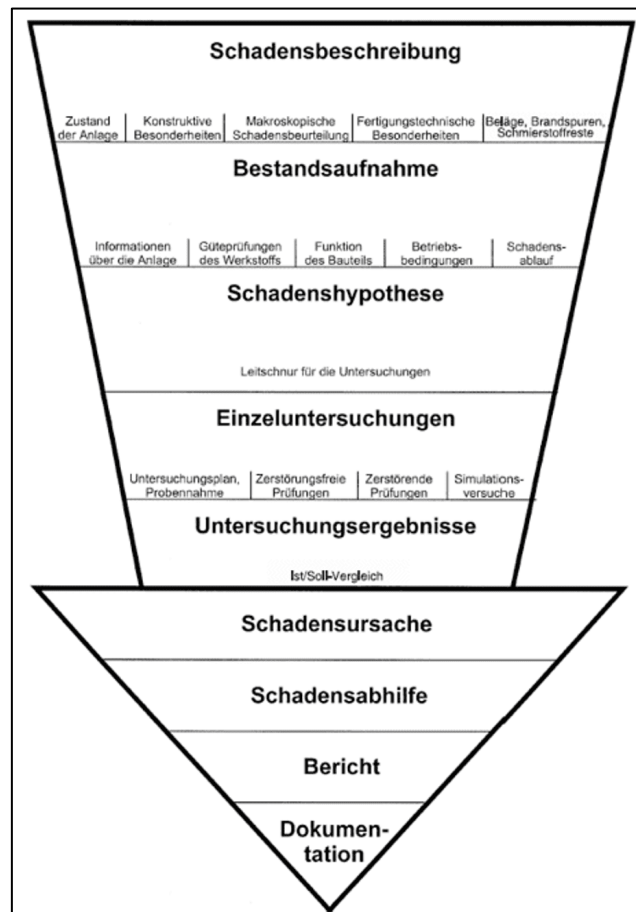


Abbildung 37: Grafik: Schadensanalyse nach VDI 3822<sup>95</sup>

Weiterhin versuchte er, eine Statistik zu erstellen über die Häufigkeit vergleichbarer Unfälle seit der Verwendung schwefelarmer Kraftstoffe. Da die erste Schwefelgrenzwert-Vorgabe im Jahr 2010 erfolgte (siehe Abbildung 10 auf S. 24) und die Kraftstoffe seitdem stetig an Komplexität zugenommen haben, erhoffte er sich ein entsprechendes Feedback von Schiffsversicherern und Klassifikationsgesellschaften.

Auf seine E-Mails an die Versicherungen erhielt er lediglich eine einzige Antwort vom Verein Hanseatischer Transportversicherer e. V. Diese besagte einerseits, dass kleinere Schäden, zu denen ein Brand im Spülluftkanal zählt, oft unterhalb des Selbstbehaltes liegen und deshalb gar nicht an die Versicherungen gemeldet würden. Andererseits würden Maschinenschäden durch die Versicherungen nicht dezidiert aufgebrochen, sondern stattdessen unter Oberbegriffen wie z. B. „Schäden an der Hauptmaschine“ zusammengefasst. Selbst, wenn solche Fälle gemeldet worden wären, könnten sie hier also nicht für die Erstellung einer Statistik „herausgefiltert“ werden.

Auf seine E-Mails an die Klassifikationsgesellschaften stellten sich ein paar mehr Antworten ein (er nennt keine Zahlen). Obwohl „teilweise“ tatsächlich von einer

<sup>95</sup> Quelle: Verein Deutscher Ingenieure (VDI): *Schadensanalyse – Grundlagen und Durchführung einer Schadensanalyse (VDI-Richtlinie 3822)* (2020).

Zunahme vergleichbarer Schadensfälle berichtet wurde, lagen offenbar bei keiner Gesellschaft verwertbare Daten in Form einer Statistik vor.

### **3.2.5.5 Austausch mit WinGD<sup>96</sup>**

Um grundsätzliche Verständnisfragen zu klären, vor allem im Zusammenhang mit der Funktionsweise der ICUs und zu möglichen bereits bekannten Problemen mit ihnen, wurde Kontakt aufgenommen zu WinGD. Die Fragen des Studenten und der BSU-Untersucher wurden ausführlich in einem E-Mail-Austausch beantwortet, sowie in einer Videokonferenz mit den BSU-Untersuchern und Vertretern der TUHH.

Die Bilder der mit der teerartigen Substanz dichtgesetzten neutralen Räume der Einspritzsteuerventile führten zu einer Erläuterung der Leckströme und der Möglichkeit eines Aufeinandertreffens von Kraftstoff und Schmieröl (Steueröl) an diesen Stellen. Diese Art der Verschmutzung des neutralen Raums sei bei Wärtsilä und WinGD seit Längerem bekannt.

Auf der Homepage von Wärtsilä wird daher ein Upgrade empfohlen. Die Gründe dafür werden in einem Film erklärt.<sup>97</sup> Ebenso stehen Produktprospekte zum Download zur Verfügung.

In dem Film wird zunächst erklärt, was dieser Untersuchungsbericht bereits dargelegt hat: Die seit 2015 wegen der Absenkung des Schwefelgrenzwertes in SECAs erhöhte Nutzung leichter Kraftstoffe führe an den metallischen Dichtflächen der ICUs zu einem beschleunigten Verschleiß. Mit der Einführung eines deutlich strengeren Grenzwertes auch außerhalb der SECAs in 2020 werde mit einer weiteren, drastischen Verschlimmerung des Problems gerechnet, in Einzelfällen bis hin zu unkontrollierter Einspritzung.

WinGD bestätigte, dass die neue ICU-Generation weniger Probleme im Betrieb mit leichten Kraftstoffen habe, es wurde jedoch betont, dass auch mit der ersten Generation jederzeit ein sicherer Betrieb möglich sei, sofern sich an die Empfehlungen in den Bulletins gehalten werde, v. a. in Bezug auf die Wartungsintervalle.

---

<sup>96</sup> WinGD: Winterthur Gas & Diesel Ltd., Joint Venture von Wärtsilä und dem chinesischen staatlichen Schiffbaukonzern CSSC, zuständig für das Engineering, also die Entwicklung und Forschung und Entwicklung im Bereich der von Wärtsilä vertriebenen Dieselmotoren. Quelle: WinGD, *Our History* (abgerufen 2022).

<sup>97</sup> Quelle: Park J. Y., *Wärtsilä FuelFlex injection control unit upgrade for RT-flex engines* (2020) (abgerufen 2022).

## **4 AUSWERTUNG**

Der Auswertungsteil dieses Untersuchungsberichts beginnt mit einer Einordnung der Aktionen und Reaktionen der Unfallbeteiligten, sowohl grundsätzlich als auch in Relation zu den ISM-Verfahrensanweisungen, die ihnen zur Verfügung standen.

Im weiteren Verlauf dieses Auswertungsteils wird die in der Bachelorarbeit vorgeschlagene Unterteilung der Schadensbewertung übernommen. Zunächst wird also die Möglichkeit einer Inkompatibilität der am Umstellungsprozess beteiligten Kraftstoffe beleuchtet, danach eventuelle Probleme mit den ICUs.

### **4.1 Krisenmanagement / Umgang mit dem Unfall**

#### **4.1.1 Generelle Bewertung**

Der Leitende Ingenieur und die Maschinenbesatzung, ebenso wie die Schiffsführung und der Lotse, reagierten nach Auffassung der BSU mit der notwendigen Gelassenheit, Umsicht und Zügigkeit zunächst auf die unregelmäßigen Abgastemperaturen, später auf das Feuer und schließlich bei den unter Zeitdruck durchgeführten Notreparaturen am Notankerplatz.

Der Umstellvorgang von Schweröl mit 3,5 % Schwefelanteil auf Gasöl mit 0,1 % Schwefel wurde nach der dazugehörigen Verfahrensweisung und in der vorab (mit dem dafür bereitgestellten Excel-Sheet) berechneten Zeit durchgeführt. Dass überhaupt auf einen leichten Kraftstoff umgestellt wurde, war aufgrund des bordseitig nicht in ausreichender Menge vorhandenen schwefelarmen Schweröls für diese Revierfahrt alternativlos. Der Leitende Ingenieur, der gerade zugestiegen war, hatte die bestellten und vorhandenen Kraftstoffmengen nicht zu verantworten.

Nach der deutlichen Erhöhung der Abgaswerte vor allem von Zylinder 10 wurde zunächst dem naheliegenden Verdacht einer erhöhten Reibung zwischen Laufbuchse und Kolben aufgrund von Cat Fines nachgegangen. Als dieser sich nicht bestätigte, beschloss der leitende Ingenieur, die Revierfahrt nicht zu unterbrechen, sondern während der kommenden Hafenziegezeit in Hamburg nach der Ursache für das Problem zu suchen und den Zylinder bis dahin auszuhängen. Da der Motor der EBBA MAERSK diese Leistungseinbuße während einer langsamen Revierfahrt leicht und vollautomatisch mit den anderen Zylindern ausgleichen kann – auf der Brücke wird dies nicht einmal bemerkt – war dies das vernünftigste Vorgehen.

Als der Alarm für Feuer im Spülluftkanal auflief, ließ er dies zunächst durch eine Temperaturmessung direkt am Motor bestätigen, bevor er umgehend die Gegenmaßnahmen ergriff. Sofort erfolgten die Kommunikation mit der Brücke und die Evakuierung des Maschinenraums. Dann griff er auf die ISM-Verfahrensweisung der Reederei zurück und löschte das Feuer, indem er sie korrekt abarbeitete.

Nach dem notwendigen Abkühlen des Motors wurde umgehend die Integrität des Hauptmotors überprüft und eine Bestandsaufnahme der Schäden durchgeführt.

Als klar wurde, dass es Probleme mit der Einspritzung auch beim elektronisch ausgehängten Zylinder gegeben hatte, wollte der Leitende Ingenieur diesen physisch

absperren, um dort am Notankerplatz nur die andere ICU überholen zu müssen. Dadurch hätte man schneller wieder eine betriebsfähige Hauptmaschine erhalten und den Notankerplatz verlassen können. Erst, als dies aufgrund des zur Verfügung stehenden Werkzeugs nicht gelang, wurden beide betroffenen ICUs mit den dafür vorgesehenen „overhaul kits“ überholt und wieder eingebaut.

Der erste Notankerplatz befand sich genau östlich der Zu- und Ausfahrt des VTG „Elbe Approach“ und war deshalb kein optimaler Ort, um mehrere Stunden mit Notreparaturen zuzubringen. Selbstverständlich liegt dies jedoch in der Natur von Notankerplätzen und kann daher sicherlich nicht negativ bewertet werden. Ganz im Gegenteil wählten Schiffsführung und Lotse in der zur Verfügung stehenden Zeit (Minuten!) den bestmöglichen Platz zwischen den beiden Verkehrsströmen. Durch eine gute Kommunikation zwischen Schiff, Verkehrszentrale und dem umliegenden Verkehr kam es weder zu einem Erliegen des Verkehrs noch zu einem Folgeunfall.

Dass der Lotse die Einfahrt in die Elbe erst nach einer Probefahrt genehmigte, war umsichtig und dem Unfallgeschehen angemessen. Als sich während der Probefahrt dennoch erneut die Abgastemperatur eines Zylinders erhöhte, konnte diesmal das Werkzeug zum physischen Absperren der dazugehörigen ICU verwendet werden, da es in der Zwischenzeit aufgearbeitet worden war. Der zweite Notankerplatz war unproblematisch.

Alle weiteren notwendigen Maßnahmen, allen voran die Überholung der ICU von Zylinder 4, konnten später in Ruhe am Liegeplatz in Hamburg durchgeführt werden.

#### **4.1.2 Maersk-Verfahrensweisungen: Feuer im Spülluftkanal**

Im ISM-System für die EBBA MAERSK finden sich zwei Dokumente zum Umgang mit einem Feuer im Spülluftkanal. Die eine ist in Textform gehalten und beschreibt das Problem ganz grundsätzlich, sowie die dazugehörigen Maßnahmen, die möglichen weitergehenden Gefahren (z. B. Kurbelraumexplosion, Turboladerpumpen, Turboladerexplosion) und das notwendige sicherheitsrelevante Verhalten.<sup>98</sup> Die andere Verfahrensweisung ist eine Checkliste, die abgearbeitet wird, um das Feuer zu löschen.<sup>99</sup>

Die BSU kann im Verhalten des Leiters der Maschinenanlage keine Abweichung von den beiden Verfahrensweisungen feststellen. Insbesondere wurde der Maschinenraum sofort evakuiert, schnell mit der Brücke kommuniziert, die Hauptmaschine umgehend heruntergefahren, die Zufuhr von Luft und Betriebsstoffen unterbrochen und die Löschanlage schnellstmöglich, aber an der korrekten Stelle im Ablauf aktiviert. Später wurde mit der Inspektion der Maschine gewartet, bis ihre Temperatur ausreichend heruntergekühlt war.

## **4.2 Kompatibilität der Kraftstoffe**

Der Umstellvorgang von einem schweren auf einen leichten Kraftstoff ging dem Unfallgeschehen, das mit den erhöhten Abgastemperaturen begann, direkt voraus.

---

<sup>98</sup> Quelle: Maersk ISM-System, *Scavenging air receivers – fire precautions* (2018).

<sup>99</sup> Quelle: Maersk ISM-System, *Flowchart – Fire (Scavenge Space)* (2021).



Dies lenkte den Verdacht der BSU-Untersucher zunächst auf das bereits seit Jahrzehnten bekannte, grundsätzliche Problem einer potentiellen Kraftstoffinkompatibilität sowie auf die Möglichkeit eines diesbezüglichen Zusammenhangs mit schweren, schwefelarmen Kraftstoffen, mit denen es häufiger zu Inkompatibilitäten kommt. Auch der teerartige Rückstand, der in den neutralen Räumen der Einspritzsteuerventile der betroffenen ICUs gefunden wurde, legte eine Kraftstoffinstabilität zunächst nahe (möglicherweise ausgefallenes Asphalt).

Aus welchem Grund es überhaupt dazu gekommen war, dass nicht genügend schwerer, schwefelarmer Kraftstoff an Bord war, konnte im Nachhinein nicht mehr festgestellt werden. Fakt ist, dass die Schiffe heute mehr verschiedene Kraftstoffe vorhalten müssen als vor Einführung der SECAs, weil aus wirtschaftlichen Gründen weiterhin so viel herkömmliches Schweröl verwendet wird wie möglich, jedoch zusätzlich weitere Kraftstoffe mitgeführt werden müssen. So ist von jeder Kraftstoffart natürlich weniger vorhanden, vor allem auf einem Schiff, das vor Einführung dieser Regelungen erbaut und z. B. mit der Anzahl der vorhandenen Tanks nicht optimal an die heutige Kraftstoffsituation angepasst ist. Eine einzige, kurzfristige Fahrplanänderung kann das Kraftstoffmanagement komplett durcheinanderbringen.

Der Möglichkeit, dass die „neuen“ Kraftstoffe einen derart schwerwiegenden Vorfall begünstigt haben könnten, sollte nachgegangen werden, selbst nachdem klar war, dass an dem aktuellen Umstellvorgang kein schwefelarmes Schweröl beteiligt gewesen war. Gerade im Fall von Ablagerungen oder Verschmutzungen kann ein langer Vorlauf vorgelegen haben.

Die beiden Tüpfeltests, die das Kraftstofflabor der TUHH durchführte, belegen einerseits eine Stabilität des schwefelhaltigen Schweröls und andererseits, dass es kompatibel war mit dem schwefelarmen Gasöl, auf das umgestellt wurde. Beide bildeten ein stabiles 1:1-Gemisch.

Die Laboruntersuchungen der beiden Kraftstoffe nach dem Bunkern sowie direkt nach dem Unfall zeigen ebenfalls keine mit einer Inkompatibilität in Zusammenhang stehenden Auffälligkeiten. Nicht einmal die sehr gründlichen Analysen des Kraftstofflabors der TUHH führten Auffälligkeiten zutage. Zwar lässt der erhöhte MCR-Wert des Gasöls darauf schließen, dass es mit geringen Mengen eines Schweröls vermischt worden sein muss. Doch auch diese Tatsache führte im Tüpfeltest zu keiner Inkompatibilität mit dem Schweröl, das sich vor der Umstellung im Kraftstoffsystem befunden hatte. Dies lässt den Schluss zu, dass es nach dem Umstellvorgang zu keinem Problem in Kraftstoffleitungen, ICUs oder Einspritzventilen kam, das in der Mischung der beiden Kraftstoffe begründet gewesen wäre.

Die Analyse der teerartigen Substanz aus den neutralen Räumen der ICUs durch die TUHH ergab, dass es sich hierbei nicht um ausgefallenes Asphalt handelte, sondern dass sie neben Schwerölanteilen vor allem hohe Anteile an Schmierölrückständen enthielt (siehe folgender Abschnitt). Dies sprach ebenfalls gegen die Theorie, dass die Substanz sich aufgrund einer Kraftstoffinkompatibilität gebildet haben könnte.

## 4.3 ICUs

### 4.3.1 Laboranalysen

Die Laboranalysen von Dr. Bullermann vom Kraftstofflabor der TUHH zeigten, dass die sichergestellten teerhaltigen Rückstände Anteile an Schmieröl und schwefelhaltigem Schweröl aufwiesen.

Wie bereits erwähnt, ist Kalziumkarbonat ein Schmierölrückstand, der sich aus der Neutralisationsreserve eines Schmieröls bildet, die dort in Form von Kalziumhydroxid vorliegt. Ein Großdiesel hat zwei Schmierölkreisläufe, einmal das sog. „Umlauföl“, das den Trieb schmiert, und einmal das „Zylinderöl“, das die Kolben schmiert und in Richtung der Abgase abdichtet. Im Umlauföl sind die basischen Bestandteile gering, meist hat es etwa TBN 5, im Vergleich zum Zylinderschmieröl, das aufgrund des direkten Kontakts mit den Abgasen, die Schwefelsäure enthalten können, ca. TBN 80 oder höher aufweist. Als Steueröl wird Umlauföl verwendet, das einen geschlossenen Kreislauf bildet, durch die niedrige TBN preiswerter ist und nicht ständig dem verwendeten Kraftstoff angepasst werden muss. Dennoch enthält auch Umlauföl geringe Anteile von Kalziumhydroxid. Und es kann wie beschrieben zu einem Leckstrom von Steueröl in den neutralen Raum der Einspritzsteuerventile der ICU kommen (siehe Kapitel 3.2.4.4, besonders Abbildung 28).

Das Kalziumkarbonat deutet also darauf hin, dass tatsächlich Steueröl in den neutralen Raum eingedrungen ist. Weiterhin muss es hier zu einer Reaktion (z. B. Verkokung) mit dem heißen Kraftstoff gekommen sein.

Dass die Vergleichsanalyse mit dem nachgelieferten, aktuell verwendeten Schmieröl kein Kalziumkarbonat zutage führte, kann bedeuten, dass die in den neutralen Raum eindringenden Schmierölmengen durchgehend gering, aber stetig waren, sodass bestimmte Bestandteile sich über die Laufzeit anreichern konnten. Es ist z. B. denkbar, dass das MGO andere Rückstände ausspülte und nur die vergleichsweise harten Bestandteile wie Kalzium zurückließ, die dann in einer entsprechenden Konzentration vorlagen. Die Kalziumkarbonatmengen einer einzigen Schmierölprobe lagen dabei jedoch womöglich unterhalb der Nachweisgrenze.

Die Frage nach der Herkunft des Kalziums in den neutralen Räumen konnte nicht abschließend beantwortet werden.

### 4.3.2 Auswertung

Aus den Wärtsilä Technical Bulletins ist bekannt, dass es in den für den Schwerölbetrieb entwickelten ICUs der ersten Generation beim vermehrten Betrieb mit leichten Kraftstoffen zu einem beschleunigten Verschleiß der Dichtflächen kommt. Die Folge dieses Verschleißes sind ungewollt starke Kraftstoffleckströme, z. B. über den Querstrom zwischen den Einspritzsteuerventilen, vom Mengenkolben kommend in Richtung der Einspritzventile. Ebenso ist bekannt, dass es mit der Einführung der strengeren Schwefelrichtlinien im Jahr 2015 flächendeckend zu ebendiesem vermehrten Betrieb mit leichten Kraftstoffen kam.

Des Weiteren warnen mehrere Bulletins und ein Wärtsilä-Film ganz konkret vor der Möglichkeit, dass dieses Phänomen zu einer Dauereinspritzung führen könnte. Es kann mit großer Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass dies bei der EBBA MAERSK der Fall war, obwohl der BSU keine Bilder von den Einspritzsteuerventilen der betroffenen ICUs und deren Ventilsitzen vorliegen.

Ist der Verschleiß so weit fortgeschritten, dass der in ungewollter Menge in Richtung Einspritzventil leckende Kraftstoff ausreichend Druck aufbauen kann, um das Nadelelement des Einspritzventils anzuheben, kommt es zu einer Dauereinspritzung mit den von der Maschinenbesatzung beobachteten „maschinengewehrartigen“ Einspritzimpulsen: Der Druck wird aufgebaut, das Nadelelement wird angehoben, durch den so ausgelöste Einspritzimpuls baut sich der Druck ab, das Nadelelement senkt sich, dann wird schnell wieder Druck aufgebaut etc. Da dies aufgrund der verschlissenen Dichtflächen im Innern einer ICU natürlich auch dann der Fall ist, wenn sie eigentlich gegen den Kraftstoff „geschlossen“ wäre, ist ein elektronisches „Aushängen“ hier wirkungslos, da dies den anliegenden Kraftstoffdruck von 700 bar nicht physisch unterbricht. Im Gegenteil fällt der Druck im Innern der ICU durch regelmäßige Einspritzungen eigentlich auch regelmäßig ab. Bei einer nur elektronisch „ausgehängten“ ICU ist dies nie der Fall, der Druck liegt also durchgehend an und ist so schlimmstenfalls in der Lage, die ungewollten Leckagen noch zu verschlimmern.<sup>78</sup>

WinGD empfahl, statt des „Aushängens“ die Magnetventile lieber außer Betrieb zu nehmen, indem man die elektrische Verbindung zu ihnen trennt. Dafür solle der untere Stecker an einem der Magnetventile abgezogen werden, woraufhin der Mengenkolben in die Endposition fahre. Der Kraftstoff entleere sich auf diese Weise komplett aus der ICU, und die Leckagen hätten keinen Zustrom mehr. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um Wissen, das durch WinGD oder Wärtsilä z. B. durch Bulletins verbreitet worden ist, konnte an Bord also absolut nicht vorausgesetzt werden.

Zusätzlich zu den vermehrten Leckagen war die Verschmutzung der neutralen Räume der Einspritzsteuerventile so stark, dass die Bewegungsfreiheit dieser Ventile womöglich eingeschränkt war. Hier gibt es fotografische Belege, doch wurde in den Bulletins kein Hinweis darauf gefunden. Dieses Phänomen war bei WinGD bekannt.

Vor dem Unfall war die Hauptmaschine der EBBA MAERSK lange nicht mehr mit einem leichten Kraftstoff betrieben worden. Es war in dem Zeitraum immer auf schwefelarmes Schweröl zurückgegriffen worden. Die genaue Dauer dieses Zeitraums konnte nicht benannt werden. Insgesamt jedoch wurde seit 2015 auch auf diesem Schiff vermehrt auf leichten Kraftstoff umgestellt.

Die teerartigen Rückstände bestanden der Analyse zufolge wie beschrieben teilweise aus Schmieröl, also Steueröl. Ebenso wurde ein Schwerölanteil nachgewiesen.

Die BSU vermutet also, dass die Umstellung von Schweröl auf Gasöl am Unfalltag quasi „das Fass zum Überlaufen brachte“. Es kann aufgrund des Alters der ICUs davon ausgegangen werden, dass der Verschleiß ihrer Dichtflächen bereits fortgeschritten war, wenn auch der Schwerölbetrieb noch durchführbar war. Bei dem Umstellvorgang erhöhte die Leckrate des leichteren Kraftstoffs sich dann plötzlich kurzzeitig auf das

Fünf- bis Zehnfache. Dies wird einerseits ausgereicht haben, um (durch die verschlissenen Dichtflächen der Einspritzsteuerventilsitze hindurch) den beschriebenen Druck aufzubauen, mit dem die Nadelemente der Einspritzdüsen angehoben werden konnten.

Andererseits reagierte der heiße, plötzlich mit einer erhöhten Leckrate in die neutralen Räume eindringende Kraftstoff nun möglicherweise verstärkt mit dem bereits vorhandenen, ungewollt hineingelangten Schmieröl und bildete den entscheidenden Anteil der Ablagerungen. Ebenso ist wie gesagt denkbar, dass Teile der bereits vorhandenen Rückstände ausgewaschen wurden und nur die härteren Bestandteile zurückblieben, die teerartige Substanz also schlagartig deutlich zäher wurde. Die Schwerölanteile des Rückstandes, vor allem sein Schwefelanteil, belegen, dass ein Teil der Ablagerungen sich schon vorher unter Reaktion mit schwefeligem Schweröl gebildet haben muss. Die Tatsache, dass die beschriebenen Probleme erst nach dem Umstellvorgang auftraten, spricht jedoch dafür, dass auch hier erst mit dem Umstellvorgang „das Fass überlief“.

Zum dauerhaften Einspritzen aufgrund des Dichtflächenverschleißes gesellte sich nach Ansicht der BSU also möglicherweise noch eine plötzlich erhöhte Unbeweglichkeit der Einspritzsteuerventile aufgrund der Ablagerungen.

Die BSU geht davon aus, dass diese unglückliche Kombination die unregulierte Einspritzung so großer Kraftstoffmengen ermöglichte, dass diese sich großflächig verteilen und sogar entzünden konnten. Als Hauptursache wird dabei jedoch der verstärkte Verschleiß durch das häufige Umstellen auf leichte Kraftstoffe mit den genannten Folgen angesehen.

## **5 SCHLUSSFOLGERUNGEN**

### **5.1 Kraftstoffunverträglichkeit beim Umstellvorgang**

Die BSU kommt zu dem Schluss, dass eine Unverträglichkeit zwischen den beiden am Umstellvorgang beteiligten Kraftstoffen nicht vorlag.

### **5.2 Fehlfunktion der betroffenen ICUs**

Die BSU kommt zu dem Schluss, dass eine Kombination

- vor allem von verschlissenen, in der Folge undichten Dichtflächen innerhalb der ICUs einerseits und
- in einem geringeren Maße auch von verschmutzten neutralen Räumen der Einspritzsteuerventile andererseits

zu dem Unfall führte.

Die verschlissenen Dichtflächen begründeten sich, den Wärtsilä Technical Bulletins folgend, in der vermehrten Umstellung auf leichte, schwefelarme Kraftstoffe seit der Absenkung der SECA-Schwefelgrenzwerte auf 0,1 % in 2015. Die Verschmutzung der neutralen Räume begründete sich, den Ausführungen von WinGD folgend, in erhöhten Steueröl- und Kraftstoffleckströmen innerhalb der ICUs in die neutralen Räume hinein.

Dass sich Verschleiß und Ablagerungen aufgrund des vorübergehenden, länger anhaltenden Betriebs mit schweren Kraftstoffen zunächst nicht bemerkbar machten, erklärt den Zeitpunkt des Unfalls: Als erstmals wieder auf einen leichten Kraftstoff umgestellt wurde, traten durch die kurzzeitig stark erhöhten Leckraten beide Probleme gleichzeitig zutage, obwohl die dazugehörigen Schäden bzw. Verschmutzungen, ggf. in weniger ausgeprägter Form, bereits vorher vorgelegen haben müssen.

Im Zuge der Condition Based Maintenance waren die Leckraten der betroffenen ICUs vor der Umstellung auf den leichten Kraftstoff unkritisch gewesen. Daraus schließt die BSU, dass die Leckraten, die der Beurteilung zugrunde liegen, ob eine ICU verschlissen ist oder nicht, sich auf einen Betrieb mit leichtem Kraftstoff beziehen müssen, wenn auf einen solchen umgestellt werden soll. Immerhin war bei den betroffenen ICUs noch nicht einmal der zugrundeliegende Minimalwert von 36.000 Betriebsstunden erreicht gewesen.

Die Leckraten im HFO-Betrieb lassen keine Aussage darüber zu, ob sie im MGO-Betrieb ebenfalls noch in einem unkritischen Bereich liegen würden. So wären die betroffenen ICUs der EBBA MAERSK im weitergeführten HFO-Betrieb wahrscheinlich noch eine Zeitlang unauffällig geblieben.

## **6 BEREITS DURCHGEFÜHRTE MAßNAHMEN**

Wärtsilä handelte bereits, als sich nach 2015 der verstärkte Verschleiß durch den vermehrten Betrieb mit leichten Kraftstoffen abzeichnete. Die Kunden wurden mit den Technical Bulletins informiert, und es wurde eine neue Generation von ICUs entwickelt, die die vielen Umstellungen besser verkraftet.

Nach dem Unfall schickte die Inspektion der EBBA MAERSK zusätzliche Overhaul Kits für die ICUs an Bord, sowie eine vollständige neue Einheit.

Maersk ließ die Kraftstoffe umgehend in einem Labor analysieren, um mögliche Probleme mit ihnen aufzudecken.



## **7 SICHERHEITSEMPFEHLUNG**

Die folgenden Sicherheitsempfehlungen stellen keine Vermutungen hinsichtlich Schuld oder Haftung dar.

### **7.1 Maersk Line**

#### Bewertung des ICU-Verschleißzustandes anhand ihrer Leckrate

Die BSU empfiehlt Maersk Line als Betreiberin der EBBA MAERSK, den Zustand einer ICU, vor allem bezüglich der verstärkten Überwachung und des kompletten Tauschs bzw. der Überholung, auf Grundlage der Leckraten im MGO-Betrieb zu beurteilen.

Wird von einem schweren auf einen leichten Kraftstoff umgestellt, muss die sich verändernde Leckrate mindestens so lang engmaschig überwacht werden, bis sie sowie die Bauteiltemperatur sich stabilisiert haben. Erst auf Basis dieser Leckrate ist zu entscheiden, ob ein weiterer Betrieb mit leichtem Kraftstoff sicher ist oder nicht.

### **7.2 WinGD**

#### Re-Evaluierung des Letter of No Objection für die Erweiterung der TBO für Flex-Komponenten der APMM-Flotte

Die BSU empfiehlt WinGD, als Rechtsnachfolgerin von Wärtsilä für diese Art von Abkommen, eine Re-Evaluierung des Letter of No Objection mit A. P. Møller-Mærsk A/S, die die abweichenden Verschleiß- und Leckraten im Betrieb mit leichten Kraftstoffen berücksichtigt.

## 8 QUELLEN

- Aderco.** *Fuel Competence* (Video). Abgerufen am 26.10.2022 von <https://aderco.com/en/Expertise>
- Alfa Laval.** (2018). *The Alfa Laval Adaptive Fuel Line BlueBook*, Technical Reference Booklet – 2018 Edition.
- Auto Motor Öl.** *Gesamtbasenzahl TBN*. Abgerufen am 21.10.2022 von <https://www.auto-motor-oel.de/ratgeber/motoroel-gesamt-basenzahl-tbn/2367/>
- Bullermann, Dr. J.** (Juli 2021). *Analysenbericht Unfall EBBA MAERSK*. (K. TUHH, Hrsg.)
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH).** *Umwelt und Schifffahrt: MARPOL*. Abgerufen am 12.10.2022 von [https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Schifffahrt/Umwelt\\_und\\_Schifffahrt/MARPOL](https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Schifffahrt/Umwelt_und_Schifffahrt/MARPOL)
- Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung (BSU).** (2011). *Brand im Maschinenraum des Passagierschiffs DEUTSCHLAND am 23. Mai 2010 um 12:30 Uhr im Hafen von Eidfjord / Norwegen* (Untersuchungsbericht). Von [https://www.bsu-bund.de/SharedDocs/pdf/DE/Unfallberichte/2011/UBericht\\_216\\_10.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bsu-bund.de/SharedDocs/pdf/DE/Unfallberichte/2011/UBericht_216_10.pdf?__blob=publicationFile&v=1) abgerufen
- Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung (BSU).** (2019). *Ausfall der Hauptmaschine und anschließendes Notankermanöver des Bulkcarriers CAPE LEONIDAS am 17. Januar 2017 auf der Elbe im Bereich Kolmar* (Summarischer Untersuchungsbericht). Von [https://www.bsu-bund.de/SharedDocs/pdf/DE/Unfallberichte/2019/Untersuchungsbericht\\_20\\_17.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bsu-bund.de/SharedDocs/pdf/DE/Unfallberichte/2019/Untersuchungsbericht_20_17.pdf?__blob=publicationFile&v=1) abgerufen
- Chalmers Sweden.** *Research reveals large emissions from ship scrubbers*. Abgerufen am 28.10.2022 von <https://www.chalmers.se/en/departments/m2/news/Pages/Research-reveals-large-emissions-from-ship-scrubbers.aspx>,
- Class NK.** (2019). *Booklet for ship crew members: Precautions concerning change-over to 0.50 % sulphur compliant fuels*.
- Class NK.** (2021). *Issues after starting to use of VLSFO*.
- Claussen, S.** (2003). *Einführung in die Betriebsstofflehre für den Schiffsbetrieb* (Vorlesungsskript). Hamburg.
- Conseil International des Machines à Combustion (CIMAC).** (01 2015). CIMAC Guideline 01 | 2015: *Cold flow properties of marine fuels*.
- Conseil International des Machines à Combustion (CIMAC).** (01 2019). *Marine fuel handling in connection to stability and compatibility*.
- Det Norske Veritas (DNV).** (13.01.2021). *Namensänderung: DNV GL wird DNV*. Abgerufen am 10.11.2022 von <https://www.dnv.de/news/namensanderung-dnv-gl-wird-dnv-194340>
- Det Norske Veritas (DNV).** *Global Sulphur Cap*. Von <https://www.dnv.com/maritime/global-sulphur-cap/index.html> abgerufen

- Deutsches Institut für Normung (DIN).** (2017). DIN ISO 8217:2017. *Mineralölerzeugnisse – Kraft- und Brennstoffe (Klasse F) – Anforderungen an Schiffahrtsbrennstoffe.*
- Deutsches Institut für Normung (DIN).** (2019). DIN EN ISO 3015:2019.
- Energielexikon.** *Schweröl.* Abgerufen am 18.10.2022 von <https://www.energielexikon.info/schweruel.html>
- Exhaust Gas Cleaning Systems Association (EGCSA).** (2012). *EGCSA Handbook 2012.* Abgerufen am 14.10.2022 von <https://www.egcsa.com/wp-content/uploads/EGCSA-Handbook-2012-A5-size-.pdf>
- Exhaust Gas Cleaning Systems Association (EGCSA).** *Rechtliche Vorgaben zum Umgang mit Schiffsabwasser.* Abgerufen am 20.10.2022 von [https://www.egcsa.com/wp-content/uploads/2019-02-18\\_texte\\_09-2019\\_rechtsgutachten\\_schiffsabwasser\\_fin.pdf](https://www.egcsa.com/wp-content/uploads/2019-02-18_texte_09-2019_rechtsgutachten_schiffsabwasser_fin.pdf)
- Grote, Norbert, WinGD.** (2020). E-Mail-Verkehr.
- Grote, Norbert, WinGD.** (2023). Videokonferenz.
- Hyundai Heavy Industries.** (06 2006). *World's Most Powerful Marine Engine Runs Successful Trial,* Bericht über den Motortestlauf am 29.05.2007, *HHI-EMD News, Ausg. 16.*
- International Maritime Organisation (IMO).** (2020). *Hot topics: Sulphur 2020.* Abgerufen am 14.10.2022 von <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>
- International Maritime Organisation (IMO).** *Our work: Air pollution.* Abgerufen am 12.10.2022 von <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Air-Pollution.aspx>
- International Maritime Organisation (IMO).** *Our work: Special MARPOL areas.* Abgerufen am 12.10.2022 von <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Special-Areas-Marpol.aspx>
- International Organisation for Standardisation (ISO).** (2017). ISO 8217:2017. *Fuel Standard for marine distillate fuels and marine residual fuels.*
- International Organisation for Standardisation (ISO).** (2019). ISO/PAS 23263:2019. *Petroleum products — Fuels (class F) — Considerations for fuel suppliers and users regarding marine fuel quality in view of the implementation of maximum 0,50 % sulphur in 2020.*
- KATALYSE Institut.** *Saurer Regen.* Abgerufen am 12.10.2022 von <http://umweltlexikon.katalyse.de/?p=5203>
- Khasawneh, R.** (2018). *Contaminated marine fuels clog ship engines in Singapore hub – surveyor.* Abgerufen am 17.11.2022 von Reuters News Agency: <https://www.reuters.com/article/singapore-bunker-shipping/contaminated-marine-fuels-clog-ship-engines-in-singapore-hub-surveyor-idINKBN1KH172>
- Koeplin, E. L.** (2020). *Schadensanalyse nach VDI 3822 – Brand in einem Spülluftkanal (Bachelorthesis).* Flensburg.

- LUKOIL.** *iCOLube®.* Abgerufen am 26.10.2022 von <https://marine-test.lukoil.com/en/iCOLube/AboutiCOLube>
- Maersk ISM-System.** (01.02.2018). *Scavenging air receivers – Fire precautions.*
- Maersk ISM-System.** (22.03.2021). *Flowchart – Fire (Scavenge Space).*
- MarineTraffic.** *Past Track EBBA MAERSK.* Abgerufen am 31.07.2020 von <https://www.marinetraffic.com/>
- Meier-Peter, H., & Bernhardt, F.** (2006). *Handbuch Schiffsbetriebstechnik.* Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag GmbH | Seehafen Verlag.
- Ministry of Transport of New Zealand.** *MARPOL Annex VI treaty text.* Abgerufen am 20.10.2022 von <https://www.transport.govt.nz/assets/Uploads/Policy/OC05343-MARPOL-Annex-VI-treaty-text.pdf>
- Park, J. Y.** (2020). Abgerufen am 12.10.2022 von <https://www.wartsila.com/services-catalogue/engine-services-2-stroke/fuelflex-injection-control-unit-upgrade/>
- Täglicher Hafenbericht (THB).** (18.01.2019). *Scrubber mit Fragezeichen.*
- Täglicher Hafenbericht (THB).** (2022). *IMO macht Mittelmeer zur ECA-Schutzzone.*
- The Loadstar.** (04.08.2016). *Maersk upgrades E-class containerships to bolster capacity.* Abgerufen am 17.11.2022 von <https://theloadstar.com/maersk-upgrades-e-class-containerships-bolster-capacity/>
- US Geological Survey (USGS).** *Examples of some organic compounds in petroleum.* Abgerufen am 20.10.2022 von <https://energy.usgs.gov/geochemistrygeophysics/geochemistryresearch/organicoriginsofpetroleum.aspx>
- VDL AEC Maritime.** *Why choose a scrubber?* Abgerufen am 12.10.2022 von <https://www.vdlaecmaritime.com/sox-scrubbing/why-a-scrubber>
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI).** (08 2020). *Schadensanalyse – Grundlagen und Durchführung einer Schadensanalyse (VDI-Richtlinie 3822).*
- Wärtsilä Services Switzerland Ltd..** (12.09.2006). *The world's most powerful engine enters service.* Abgerufen am 11.01.2022 von <https://www.wartsila.com/media/news/12-09-2006-the-world's-most-powerful-engine-enters-service>
- Wärtsilä Services Switzerland Ltd..** (2008). *Wärtsilä RT-flex96C and Wärtsilä RTA96C Technology Review.*
- Wärtsilä Services Switzerland Ltd..** (2015). *Flex Agreement, Appendix 3.*
- Wärtsilä Services Switzerland Ltd..** (04.05.2015). *Technical Bulletin RT-82: Operation on distillate fuels.*
- Wärtsilä Services Switzerland Ltd..** (04.09.2015). *Letter of No Objection (LONO) for TBO Extension of Flex Components on APMM Fleet.*
- Wärtsilä Services Switzerland Ltd..** (29.11.2016). *Wärtsilä Technical Bulletin RT-123: Inspection and overhaul intervals.*

**Wärtsilä Services Switzerland Ltd..** (20.07.2018). *Maintenance scheme RTFlex96 Injection Control Unit (ICU).*

**Wärtsilä Services Switzerland Ltd..** (27.11.2018). Wärtsilä Technical Bulletin RT-126: *Diesel Engine Fuels.*

**Wärtsilä Services Switzerland Ltd..** (12.08.2019). Wärtsilä Technical Bulletin RT-229: *Operation Guidance to the Global Sulphur Cap 2020.*

**Wärtsilä Services Switzerland Ltd..** (25.05.2020). *Upgrading of Wärtsilä FuelFlex Injection Control Unit enables reliable operation with low-sulphur fuels* (Presseerklärung).

**Wärtsilä Sea and Land Academy.** (2009). *RT-flex Control Elements.*

**Wikipedia (deutsch).** *Fettsäuremethylester.* Abgerufen am 20.10.2022 von Wikipedia (deutsch): <https://de.wikipedia.org/wiki/Fettsäuremethylester>