

Mega-Schiffe – Mega-Irrtum?

Ulrich Malchow

vormals "Maritime Economics", Hochschule Bremen

Inwieweit ist ein weiteres Größenwachstum der "Ultra Large Container Ships" aus Betreibersicht noch sinnvoll? Wird eventuell schon mit den aktuellen Schiffsgrößen das Gegenteil dessen bewirkt, was durch das Größenwachstum aus Betreibersicht eigentlich erreicht werden soll? Diesen Fragen wird anhand einiger grundsätzlicher Überlegungen nachgegangen, wobei insbesondere die Auswirkungen der längeren Hafentiegezeiten der immer größer werdenden Schiffe mit Hilfe von Proportionalitäten untersucht werden.

[Schlüsselwörter: ULCS, Economies-of-Scale, Fuel/TEU-Indicator, Total Costs-Indicator, Umschlagsproduktivität, Carbon Footprint]

1 HINTERGRUND

"Ultra Large Container Ships" (ULCS) mit mehr als 12.000 TEU sind mittlerweile die Arbeitspferde der weltweiten Containerschiffahrt. Grund für das auch von vielen Branchenkennern nicht für möglich gehaltene Größenwachstum der Schiffe auf aktuell rd. 24.000 TEU ist das Bestreben, die Economies-of-Scale (EoS) noch intensiver zu nutzen, um damit die Kosten pro transportiertem TEU weiter zu senken.

Der Containertransport über See ist ein Geschäft, in dem der Wettbewerb i.W. über den Preis erfolgt. So ist das Streben der Carrier nach Kostenführerschaft nur allzu verständlich. Die Nutzbarmachung der EoS ist dabei eine der wirkungsvollsten Möglichkeiten, denn Schiffbau- und Bunkerölpreise sowie Schiffsbetriebs-, d.h. i.W. Besatzungskosten, müssen als weltweit für alle Carrier auf einigermassen demselben Niveau angesehen werden.

Dass alle drei Kostenarten pro TEU im Grundsatz zunächst asymptotischen Kurven folgen, deren Verlauf mit wachsender Schiffsgröße immer flacher wird, ist bereits dargelegt worden [1] [2] [3] [4]. Der Kostenvorteil pro TEU wird demnach mit wachsender Schiffsgröße immer geringer, während sich die Schiffsbetreiber gleichzeitig immer größere operationelle Nachteile einhandeln, wie z.B. nautische Beschränkungen, größere Havarierisiken und -schäden sowie längere Hafentiegezeiten, die natürlich auch Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben, aber offenbar gern ausgeblendet werden, denn das Schiffsgrößenwachstum hält an.

Dass sich hierbei ein Verkehrsträger auf Kosten der anderen Glieder der intermodalen überseeischen Transportketten fortlaufend optimiert, ist mittlerweile in der Fachwelt weitgehend anerkannt: Wenn all die öffentlichen und privaten Investitionen berücksichtigt würden, die in den Häfen und bei den Hinterlandverkehrsträgern getätigt werden mussten, um mit den Abmessungen der Giganten und der von ihnen verursachten "Peak Loads" fertig zu werden, müsste konstatiert werden, dass die Entwicklung volkswirtschaftlich schon längst keinen Sinn mehr ergibt [5] [6].

Angesichts aktueller Überlegungen, über das aktuelle Maximum von rd. 24.000 TEU jedoch noch weiter hinauszugehen und des Umstandes, dass die Suez-Kanal-Behörde den weiteren Ausbau des Kanals, der diesen Sprung auch zulassen würde, bereits beschlossen hat, ist davon auszugehen, dass sich auch in einem mittlerweile sehr konsolidierten Carrier-Umfeld immer ein Unternehmen finden wird, das ohne große Überlegung den eingeschlagenen Wachstumspfad blindlings fortsetzen wird, worauf sich die anderen Marktteilnehmer erfahrungsgemäß genötigt sehen würden, nachzuziehen, um im Wettbewerb um die niedrigsten Slotkosten nicht vermeintlich "achteraus zu segeln", zumal aktuelle Arbeiten einem fortgesetzten Größenwachstum der Schiffe weitere EoS-Effekte attestieren [7] [8] [9].

Das soll Grund genug sein, die Sinnhaftigkeit des Einsatzes dieser Schiffe aus Carrier-Sicht einmal grundsätzlich und objektiv zu untersuchen. Hierbei sollen insbesondere die Auswirkungen der zwangsläufig längeren Hafentiegezeiten der ULCS im Fokus stehen. Basis der Betrachtung sind relativ einfache geometrische und physikalische Relationen. Um möglichst allgemeingültige Zusammenhänge zu erkennen, die von den Spezifika einzelner Schiffe und Häfen unabhängig sind, und auch um hochkomplexe Einzelberechnungen zu vermeiden, beruhen die nachfolgenden Berechnungen i.W. auf der Anwendung allgemeingültiger Proportionalitäten:

2 RECHNUNG

Die Rundreisedauer setzt sich grundsätzlich zusammen aus Fahr- und Hafentiegezeit, die sich wiederum in Revier- und Seezeit sowie die reine Umschlagszeit und deren Nebenzeiten unterteilen lassen:

$$t_{\text{round voyage}} = t_{\text{navigating}} + t_{\text{port}} \quad (1)$$

$$= t_{\text{coastal}} + t_{\text{sea}} + t_{\text{container handling}} + t_{\text{waiting}} \quad (2)$$

Revierzeiten (inkl. Kanalpassagen) sowie unproduktive Nebenzeiten in den Häfen (z.B. Verfahren der Containerbrücken, Niederlegen/Hochfahren der Ausleger, Warten auf Tide, Lotse oder Schichtanfang sowie Schichtpausen und Windunterbrechungen etc.) werden in Summe als konstant sowie als von der Schiffsgröße und -geschwindigkeit unabhängig angesehen und werden in $t_{\text{coastal+waiting}}$ zusammengefasst. Bei feststehender Rundreisedauer muss sich bei verlängerter Umschlagszeit die Zeit auf See verkürzen. Eine übliche 12-wöchige N.Europa-Fernost-Rundreise setzt sich aktuell typischerweise aus folgenden Zeitbestandteilen zusammen:¹

$$t_{\text{round voyage}} = t_{\text{sea}} + t_{\text{cont.handl.}} + t_{\text{coast.+wait.}} = \quad (3)$$

$$59 \text{ days} + 19 \text{ days} + 6 \text{ days} = 84 \text{ days}$$

Für die Berechnung der benötigten kumulierten maximalen Umschlagszeit über alle Häfen wird davon ausgegangen, dass die gesamte Containerkapazität eines Schiffes CC [TEU] je Fahrtrichtung einmal vollständig geladen und wieder gelöscht wird (Wayport Cargo und Umstauer bleiben damit unberücksichtigt). Die Anzahl der Häfen, auf die sich die umzuschlagende Containermenge aufteilt, ist bei dieser Herangehensweise unerheblich. Die entsprechenden Revier- und Nebenzeiten sind in $t_{\text{coastal+waiting}}$ [days] enthalten. Die über alle Häfen kumulierte minimale reine Umschlagszeit $t_{\text{container handling}}$ [days] wird daher bestimmt von der Containerkapazität des Schiffes CC [TEU], dem Faktor 4 moves/Ctr (2 x laden, 2 x löschen), der tatsächlichen durchschnittlichen Auslastung (Utilisation Rate) UR , dem vorherrschenden TEU-Faktor TF [TEU/Ctr], der durchschnittlichen Umschlagsrate der Containerbrücken (Handling Rate) HR [moves/hr] in dem betreffenden Fahrtgebiet sowie der Anzahl der maximal an einem Schiff stellbaren Brücken n_C :

$$t_{\text{container handling}} = \frac{CC \cdot 4 \cdot \frac{\text{moves}}{\text{Ctr}} \cdot UR}{TF \cdot HR \cdot n_C} \quad (4)$$

Die Umschlagsrate der einzelnen Brücke ist abhängig von der ihr möglichen Geschwindigkeiten (Katzfahrwerk, Hubwerk, Vorhandensein eines 4-TEU-Spreaders und/oder eines 2-Trolley-Betriebes sowie der Geschicklichkeit der Fahrer) und dem Weg, den jeder Container bei einem Lastspiel zurücklegen muss. Die Brückenausstattung und ihre daraus resultierende Geschwindigkeit sind von Terminal zu Terminal unterschiedlich und sollen nicht weiter betrachtet werden. Sie ändert sich nicht mit der Schiffsgröße und fällt als Konstante heraus (Voraus-

setzung: Größer werdende Schiffe können noch mit denselben Geräten abgefertigt werden). Dagegen ist der von den Containern zurückzulegende Weg stark von der Schiffsgröße abhängig.

Um die Wege zu ermitteln, die die Container zurücklegen müssen, werden die Hauptspantquerschnitte von 1.100 TEU- bis hin zu schon projektierten 32.000 TEU-Schiffen (jeweils Nominalkapazität) mit Hilfe eines einfachen Kästchenrasters untersucht (Abbildung 1). Hierbei werden auch geometrische Varianten innerhalb einer Größenklasse berücksichtigt (z.B. geringere Breite aber dafür mehr Lagen im Raum und/oder an Deck). Die einzelnen Wege werden durch einfaches Abzählen der Kästchen ermittelt, die jeder Container zu einer für alle Schiffsgrößen identischen Aufnahme-/Absetzposition auf der Pier zurücklegen muss und daraus der Mittelwert gebildet. Die Einheit der Strecke ist dabei irrelevant. Es reichen "Kästchen" als Äquivalent zum Weg. In der Praxis werden durch die Überlagerung von Horizontal- und Vertikalbewegung allerdings Bahnkurven gefahren, wodurch sich der tatsächlich zurückgelegte Weg reduziert. Diese Verkürzung wird jedoch als von der Schiffsgröße unabhängig angenommen, so dass die Vergleichbarkeit der "eckigen" Wege nicht beeinträchtigt ist. Einheitliche Umschlagsprämissen über alle Querschnitte sind: Die Container unter Deck werden in Höhe der 6. Lage an Deck über die Bordkante gehievt (um auch bisweilen zu überfahrende Containertürme zu berücksichtigen). Die Container an Deck werden um jeweils 3 Lagen angehoben bevor sie horizontal bewegt werden. Selbst wenn die Prämissen nicht ganz der Praxis entsprechen, ist durch ihre einheitliche Anwendung die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben. Daher sind die absoluten Werte der Prämissen letztendlich nicht von entscheidender Bedeutung.

Aus den durchschnittlichen Werten je Hauptspantquerschnitt ergibt sich über die Schiffsgrößen eine Regressionsfunktion von hoher Güte (Abbildung 2), so dass für die Umschlagsrate pro Brücke HR folgende Proportionalität gilt:

$$HR = \frac{\text{crane speed}}{\varnothing \text{path length}} \sim \frac{1}{\varnothing \text{no. of 'boxes'}} = \frac{1}{f(CC)} = \quad (5)$$

$$\frac{1}{4,5262 \cdot CC^{0,211}} \sim CC^{-0,211}$$

Die ermittelte Proportionalität gem. Gl. (5) deckt sich sehr gut mit der Aussage von Benjamin Lai (Managing Director, Modern Terminals Ltd., Hong Kong), der schon 2015 berichtet hatte, dass sich der Weg der Container bei den sogenannten "Triple-E"-Schiffen von Maersk (18.300 TEU) ggü. einem üblichen Panamax-Schiff (ca. 4.500 TEU) an seinem Terminal um ca. 50% verlängert hat [11].

¹ Abschätzung auf Basis der Fahrplandaten von Hapag-Lloyd (FE 2 Service) [10]

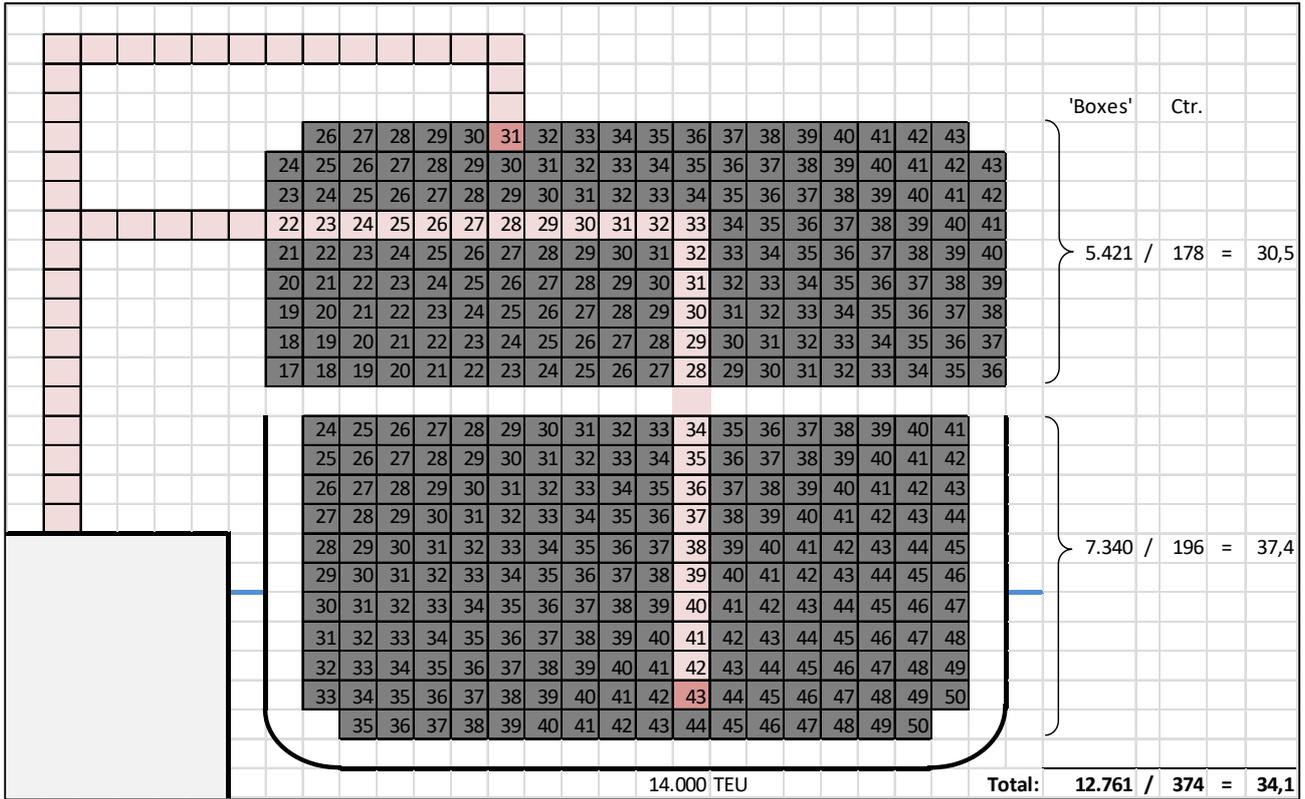


Abbildung 1

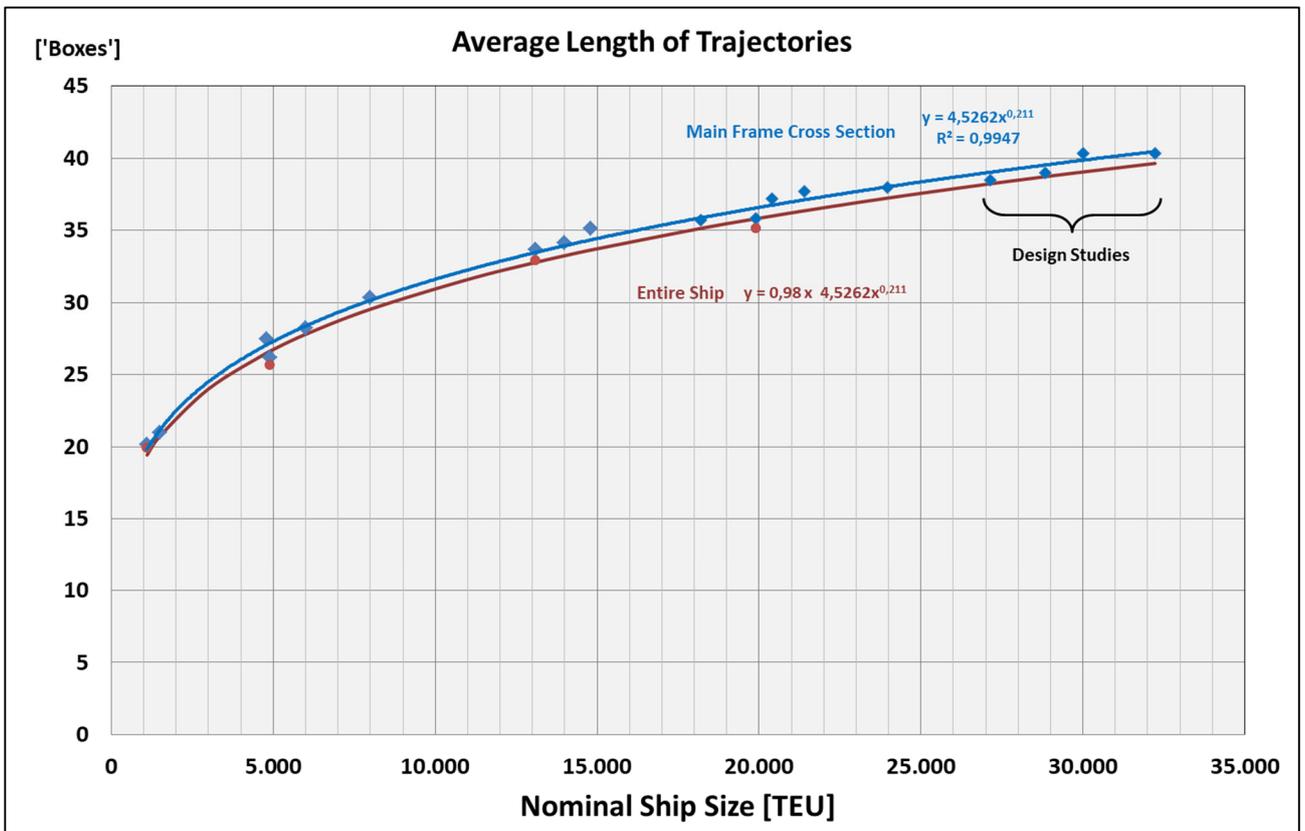


Abbildung 2

Der Hauptspantquerschnitt ist jedoch nicht repräsentativ für das gesamte Schiff. Zu den Schiffsenden verringert sich insbesondere die Anzahl der unter Deck gestauten Container. Daher werden für vier exemplarische Schiffsgößen (1.100 TEU, 4.900 TEU, 13.100 TEU, 19.900 TEU) Bay für Bay die Umschlagswege jedes einzelnen Containers ermittelt und daraus der Mittelwert für das gesamte Schiff gebildet. Dabei stellt sich für alle untersuchten Schiffsgößen heraus, dass der Mittelwert für das gesamte Schiff quasi "konstant" 98% des Mittelwertes für den jeweiligen Hauptspant beträgt, so dass von einer Allgemeingültigkeit ausgegangen wird (Abbildung 2). Da dieser Prozentsatz somit als fester Faktor anzusehen ist, ändert sich die Allgemeingültigkeit der ermittelten Proportionalität gem. Gl. (5) nicht.

Die Anzahl der maximal an einem Containerschiff stellbaren Containerbrücken ist naturgemäß proportional

zur Schiffslänge, wobei dies kein stufenloser Zusammenhang ist: Die Schiffslänge muss mindestens um 2 x 40ft-Bays verlängert werden, um eine weitere Brücke stellen zu können, bzw. es muss ein gewisser Mindestabstand zwischen den Brücken eingehalten werden. Auch die Schiffgröße selbst wächst nicht stufenlos. Im Interesse der Rechenbarkeit und um grundsätzliche Zusammenhänge zu erkennen, wird jedoch von stetigen Funktionen ausgegangen.

Abramowski et al. haben für Containerschiffe mit $CC < 20.000 TEU$ folgende logarithmische Regressionsgleichung für die Länge zwischen den Loten LPP ermittelt ($R^2 = 0,978$), wobei die Datenlage im Bereich $CC > 14.000 TEU$ mit nur 7 Schiffen relativ dünn war [12]:

$$LPP[m] = 1,5022 + 0,413355 (\ln CC[TEU])^3 \quad (6)$$

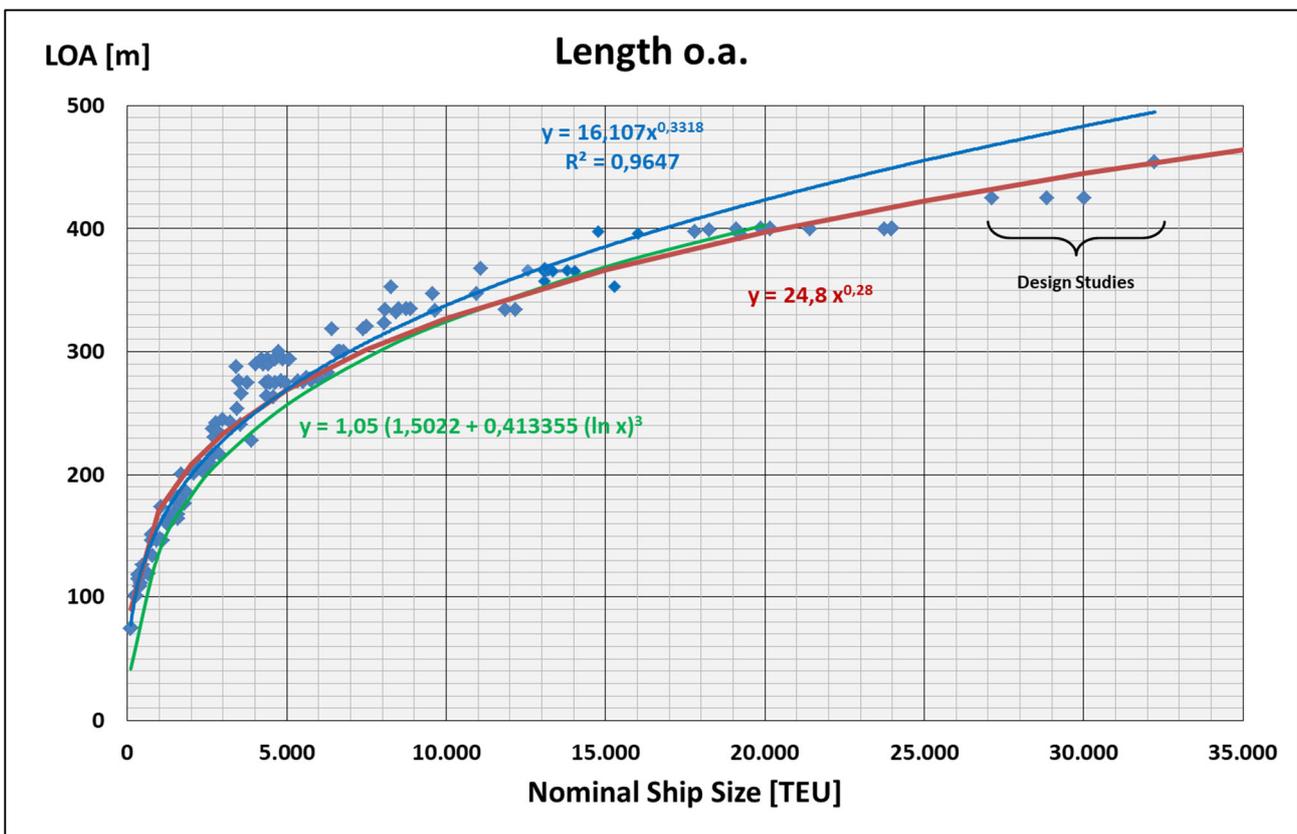


Abbildung 3

Die Länge zwischen den Loten LPP wird mit einem Aufschlag von 5% versehen (Durchschnittswert aus dem Datenfundus), um die Länge über alles LOA zu erhalten (grüne Linie in Abbildung 3). Bezogen auf den verwendeten Datenfundus weist diese Regressionsgleichung bei kleineren Schiffsgößen allerdings zu geringe Werte aus. Bei sehr großen Schiffen ist dagegen ersichtlich, dass die Gleichung zu hohe Werte ergibt.

Grundsätzlich besagt das kubische Gesetz, dass die Abmessungen eines Quaders mit der dritten Wurzel seines Rauminhaltes wachsen ($L, B, H \sim V^{1/3}$). Die hohe Güte der entsprechenden Regressionsanalyse einer großen Anzahl von untersuchten Containerschiffen bestätigt im Prinzip diese Gesetzmäßigkeit auch für das Verhältnis von Containerkapazität CC und Länge ü.a. LOA (blaue Linie in Abbildung 3). Jedoch zeigt sich, dass die hohe Regressionsgüte im Wesentlichen aus der Vielzahl kleinerer

Schiffe resultiert. Für die hier interessierenden größeren Einheiten, von denen jedoch deutlich weniger Datensätze vorliegen, ergeben sich mit der ermittelten Regressionsgleichung eindeutig zu große Schiffslängen. Folgende Exponentialgleichung bildet die Abhängigkeit der Schiffslänge LOA von der Container-Kapazität CC bei den großen Schiffen (bis hin zu projektierten 32.000 TEU-Schiffen) deutlich besser ab (rote Linie in Abbildung 3):

$$LOA = 24,8 CC^{0,28} \quad (7)$$

Gl. (7) harmoniert auch sehr gut mit den Ergebnissen von Park und Suh, die für Containerschiffe, allerdings mit $CC > 7.000 TEU$, folgenden Zusammenhang ermittelt haben: $L = 25,08 CC^{0,28}$ [13]. Demnach wächst die Anzahl der maximal stellbaren Brücken über die Container-Kapazität CC tatsächlich noch geringer als nach dem kubischen Gesetz (die konkrete Anzahl der tatsächlich stellbaren Brücken ist bei dieser Betrachtung irrelevant):

$$n_c \sim LOA = f(CC) = 24,8 CC^{0,28} \sim CC^{0,28} \quad (8)$$

Werden die Proportionalitäten aus Gl. (5) und (8) in Gl. (4) eingesetzt, zeigt sich, dass die benötigte reine Umschlagszeit $t_{container\ handling}$ näherungsweise grundsätzlich direkt proportional zur Containerkapazität CC wächst:

$$t_{container\ handling} = \frac{CC \cdot 4 \text{ moves} / Ctr. \cdot UR}{TF \cdot HR \cdot n_c} \sim \frac{CC}{CC^{-0,211} \cdot CC^{0,28}} = \frac{CC}{CC^{0,069}} = \quad (9)$$

$$CC^{0,931} \approx CC$$

$$t_{container\ handling} \sim CC \quad (10)$$

Diese praktische Proportionalität resultiert aus dem Umstand, dass sich die Exponenten zur Bestimmung der Umschlagsrate und der Brückenanzahl annähernd zu Null addieren. Demnach bewirkt die längere durchschnittliche Bahnkurve der Container und die zur Container-Kapazität nicht proportional zunehmende Anzahl stellbarer Brücken, dass die Umschlagszeit prinzipiell proportional zur Container-Kapazität CC zunimmt. Dabei ist es unerheblich, wie schnell die Brücken konkret arbeiten, wieviel Brücken tatsächlich zum Einsatz kommen und welcher TEU-Faktor TF bzw. welche Auslastung UR vorliegt, da diese konstanten Faktoren in der Proportionalitätsbetrachtung herausfallen können. Kann allerdings die Anzahl der Brücken nicht entsprechend der Länge gesteigert werden (z.B. weil nicht genug zur Verfügung stehen), wächst $t_{container\ handling}$ sogar überproportional zu CC .

Soll die Rundreisendauer bei länger werdender Umschlagszeit konstant gehalten werden, um sowohl die Abfahrtsfrequenz zu halten (z.B. für "Fixed Day Sailings") als auch die Anzahl der Schiffe nicht zu erhöhen, muss die Zeit auf See durch eine entsprechend höhere Geschwindigkeit reduziert werden:

$$t_{sea} = t_{round\ voyage} - t_{coastal+wait.} - t_{cont.handl.} \quad (11)$$

Die Zeit auf See t_{sea} ist durch die feste Seedistanz S_{sea} bestimmt, die durch die Durchschnittsgeschwindigkeit v_\emptyset geteilt wird. Die gegebene Rundreisendauer $t_{round\ voyage}$ und die festen von der Schiffsgröße und der Geschwindigkeit unabhängigen Abzüge $t_{coastal+waiting}$ werden zu der festen Zeit $t_{round\ voyage}$ zusammengefasst. Für die festgestellte praktische Proportionalität von reiner Umschlagszeit $t_{container\ handling}$ und Container-Kapazität CC wird der Umschlagfaktor k_i [$days/TEU$] eingeführt (Gl. (12)), der die vorherrschende durchschnittliche Umschlagsproduktivität in einem Liniendienst abbildet (technische Leistungsfähigkeit der Umschlagsgeräte sowie "weiche" Faktoren des Umschlages, z.B. der Ausbildungsstand der Fahrer oder das Schichtsystem). k_i wird als unabhängig von der Schiffsgröße definiert aber entsprechend der zugrundeliegenden Schiffsgröße indiziert:²

$$t_{container\ handling} = k_i CC \quad (12)$$

$$\frac{S_{sea}}{v_\emptyset} = t_{sea} = t_{r.voy.} - t_{coastal+wait.} - t_{cont.handl.} = t_{round\ voyage} - k_i CC \quad (13)$$

Nach Bildung der Reziproken lässt sich für die erforderliche Durchschnittsgeschwindigkeit somit folgende Proportionalität aufstellen (die Strecke S_{sea} bleibt naturgemäß konstant):

$$v_\emptyset \sim \frac{1}{t_{round\ voyage} - k_i CC} \quad (14)$$

Mit Hilfe der im schiffbaulichen Vorentwurf verwendeten sogenannten "Admiralitätsformel" lässt sich unter Verwendung der jeweiligen (schiffsspezifischen) "Admiralitätskonstante" $C_{Admiral}$ aus dem Displacement Δ [t] eines Schiffes und der Geschwindigkeit v_\emptyset die benötigte Leistung P ermitteln, zu der wiederum der Brennstoffverbrauch (als Massenstrom) \dot{m}_{fuel} [t/Tag] proportional ist [14]:

$$\dot{m}_{fuel} \sim P = \frac{\Delta^{\frac{2}{3}} v_\emptyset^3}{C_{Admiral}} \quad (15)$$

² Trotz seiner Einheit ist der Umschlagfaktor k_i [$days/TEU$] nicht mit der durchschnittlichen Dauer eines Brückenlastspiels (move) zu verwechseln. "TEU" im Nenner bezieht sich in diesem Fall auf die nominelle Schiffskapazität und nicht auf einen einzelnen 20ft-Container. Der Faktor bezieht sich auf vier Umschlagsvorgänge (2 x laden, 2 x löschen) der gesamten Containerladung (mit allen arbeitenden Brücken). Der Faktor k_i gibt also (bei gegebenem TEU-Faktor TF , der definitionsgemäß nur in einer Bandbreite $TF = 1,0 \dots 2,0 TEU/Ctr$ schwanken kann) den durchschnittlichen Umschlagsstandard über alle Häfen in einem konkreten Liniendienst wieder.

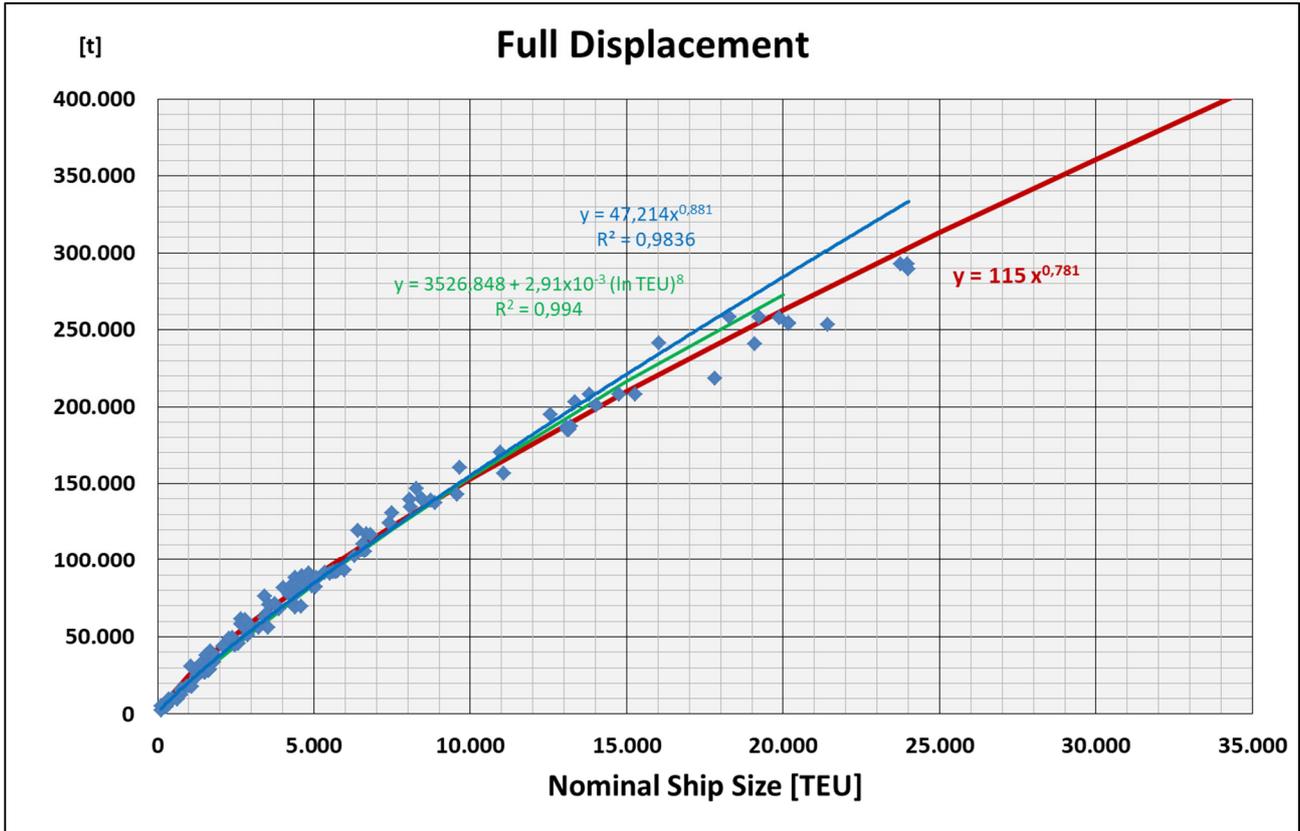


Abbildung 4

Aus dem zur Verfügung stehenden Datenfundus ergibt sich ein schwach exponentieller Zusammenhang zwischen Container-Kapazität CC und Deplacement (auf Sommertiefgang) Δ mit einem Exponenten nahe bei "1" (blaue Linie in Abbildung 4). Die hohe Güte der fast linearen Regressionsgleichung beruht auch hier auf den zahlreichen kleineren Schiffen. Für die großen Schiffe liefert sie jedoch augenscheinlich zu hohe Werte (für die bislang lediglich projektierten Schiffe mit $CC > 24.000$ TEU liegen naturgemäß noch keine entsprechenden Werte für Δ vor). Abramowski et al. haben für Schiffe mit $CC < 20.000$ TEU eine logarithmische Regressionsgleichung ermittelt ($R^2 = 0,994$), wobei die Datenlage im Bereich $CC > 14.000$ TEU mit nur 7 Schiffen relativ dünn war [12]:

$$\Delta [t] = 3526,844 + 2,91 \times 10^{-3} (\ln CC [TEU])^8 \quad (16)$$

Augenscheinlich liefert auch diese Regressionsgleichung bei sehr großen Schiffen zu große Werte (grüne Linie in Abbildung 4). Daher wird auch hier nachjustiert und stattdessen folgende Exponentialgleichung gefunden (rote Linie in Abbildung 4):

$$\Delta [t] = 115 CC [TEU]^{0,781} \quad (17)$$

Der für die Propulsion erforderliche Brennstoffverbrauch \dot{m}_B ist gem. Gl. (15) sowohl proportional zu $\Delta^{2/3}$

als auch zu v_θ^3 (es wird angenommen, dass $C_{Admiral}$ für die Schiffskategorie der ULCS auch bei wachsender Schiffsgröße praktisch konstant bleibt und daher in der Proportionalitätsbetrachtung herausfallen kann):³

$$\dot{m}_{fuel} \sim \Delta^{2/3} v_\theta^3 \quad (18)$$

Wird Gl. (18) auf beiden Seiten mit der Seezeit t_{sea} und CC^{-1} erweitert, ergibt sich die proportionale Abhängigkeit der über die betreffende Seedistanz benötigten absoluten Brennstoffmenge pro TEU gem. Gl. (20):

$$\dot{m}_{fuel} t_{sea} \sim \Delta^{2/3} v_\theta^3 t_{sea} \quad (19)$$

$$\frac{\dot{m}_{fuel}}{CC} \sim \frac{\Delta^{2/3} v_\theta^3 t_{sea}}{CC} \quad (20)$$

Werden in Gl. (20) für Δ , v_θ und t_{sea} die Gl. (17), (14) und (13) eingesetzt und umgeformt ergibt sich:

³ Eine auch über verschiedene Schiffe tatsächlich konstante Admiraltätskonstante kann nach Schneekluth angenommen werden, wenn "entwurfsmäßig ähnliche" Schiffe vorliegen [12] (S. 309), wovon bei ULCS auszugehen ist (die einzige Ausnahme bilden die "Triple-E"-Schiffe von Maersk (18.300 TEU), die als Doppelschrauber ausgebildet sind).

$$\frac{m_{fuel}}{CC} \sim \frac{(115 CC^{0,781})^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{t_{round\ voyage'} - k CC} \right)^3 (t_{round\ voyage'} - k CC)}{CC} \quad (21)$$

$$\sim \frac{(CC^{0,781})^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{t_{round\ voyage'} - k CC} \right)^2}{CC} = \frac{CC^{-0,479}}{(t_{round\ voyage'} - k CC)^2}$$

$$\frac{m_{fuel}}{CC} \sim \frac{1}{CC^{0,479} (t_{round\ voyage'} - k CC)^2} \quad (22)$$

Somit ist für die über die gegebene Seedistanz einer Rundreise benötigte Brennstoffmenge pro TEU m_{fuel}/CC eine direkte Abhängigkeit ausschließlich von der (nominellen) Container-Kapazität der Schiffe CC , der gegebenen Rundreisedauer (abzüglich ihrer fixen Zeitanteile) $t_{round\ voyage'}$ sowie der Umschlagsproduktivität in Form des Umschlagfaktors k_i gefunden worden. Aufgrund der stöchiometrischen Verhältnisse ist dazu der spezifische CO_2 -Ausstoß pro TEU über die Rundreise m_{CO_2}/CC proportional:

$$\frac{m_{CO_2}}{CC} \sim \frac{m_{fuel}}{CC} \quad (23)$$

Für $t_{round\ voyage'}$ können gängige Werte aus der Praxis, z.B. einer 12-wöchigen N.Europa-Fernost-Rundreise, eingesetzt werden (vgl. Gl. (3)):¹

$$t_{round\ voyage'} = t_{round\ voyage} - t_{coastal+waiting} \quad (24)$$

$$= 84\ days - 6\ days = 78\ days$$

Der Umschlagfaktor k wird mit Hilfe der tatsächlichen, über eine Rundreise kumulierten reinen Umschlagszeiten und der dort eingesetzten Schiffsgröße (hier: 13.000 TEU), für einen konkreten Liniendienst kalibriert (s.o.):¹

$$k_{13.000} = \frac{t_{container\ handling}}{CC} = \frac{19\ days}{13.000\ TEU} \quad (25)$$

$$= 1,462 \times 10^{-3} \frac{days}{TEU}$$

Der Term $(t_{round\ voyage'} - k_i CC)^{-2}$ in Gl. (22) entspricht dem reziproken Quadrat der Seezeit t_{sea} . Je kürzer sie wird (um bei wachsender Schiffsgröße und daher längerer Umschlagszeit die Rundreisedauer zu halten), umso mehr Brennstoff pro TEU wird über die betreffende

Seedistanz benötigt (mit quadratischer Wirkung). Dem entgegen wirkt der EoS-Effekt – allerdings nur mit dem Faktor $CC^{-0,479}$. Das ist eine Exponentialfunktion mit asymptotischem Verlauf, d.h. der Effekt wird mit wachsender Schiffsgröße immer geringer.

In dem Term $(t_{round\ voyage'} - k_i CC)^{-2}$ finden somit die jeweiligen grundlegenden operationellen Gegebenheiten eines Fahrtgebietes bzw. eines konkreten Liniendienstes ihren Niederschlag. Sie dienen als Ausgangspunkt der Untersuchung zur Abhängigkeit des spezifischen Brennstoffbedarfs pro TEU von der Schiffsgröße.

Der gesamte Term...

$$\frac{1}{CC^{0,479} (t_{round\ voyage'} - k_i CC)^2}$$

...aus Gl. (22) hat keine "vernünftige" Einheit. Er ist jedoch direkt proportional zur benötigten Brennstoffmenge bzw. dem CO_2 -Ausstoß pro TEU über die betreffende Seedistanz der Rundreise und wird hier als "Fuel/TEU-Indicator" eingeführt. Es handelt sich dabei also keinesfalls um die absolute Brennstoffmenge pro TEU! Diese ist jedoch proportional zum ermittelten "Fuel/TEU-Indicator". Es ist nun von besonderem Interesse, ob die Kurve im Bereich üblicher oder zukünftig noch realisierbar erscheinender TEU-Kapazitäten ein Minimum aufweist und wo dieses ggf. liegt.

Es stellt sich heraus, dass der "Fuel/TEU-Indicator" für eine typische 12-wöchige N.Europa-Fernost-Rundreise mit $t_{round\ voyage'} = 78\ days$ und einem Umschlagfaktor $k_{13.000} = 1,462 \times 10^{-3} \frac{days}{TEU}$ bei $CC \approx 10.300\ TEU$ (abgelesen) tatsächlich ein Minimum aufweist (Abbildung 5)!

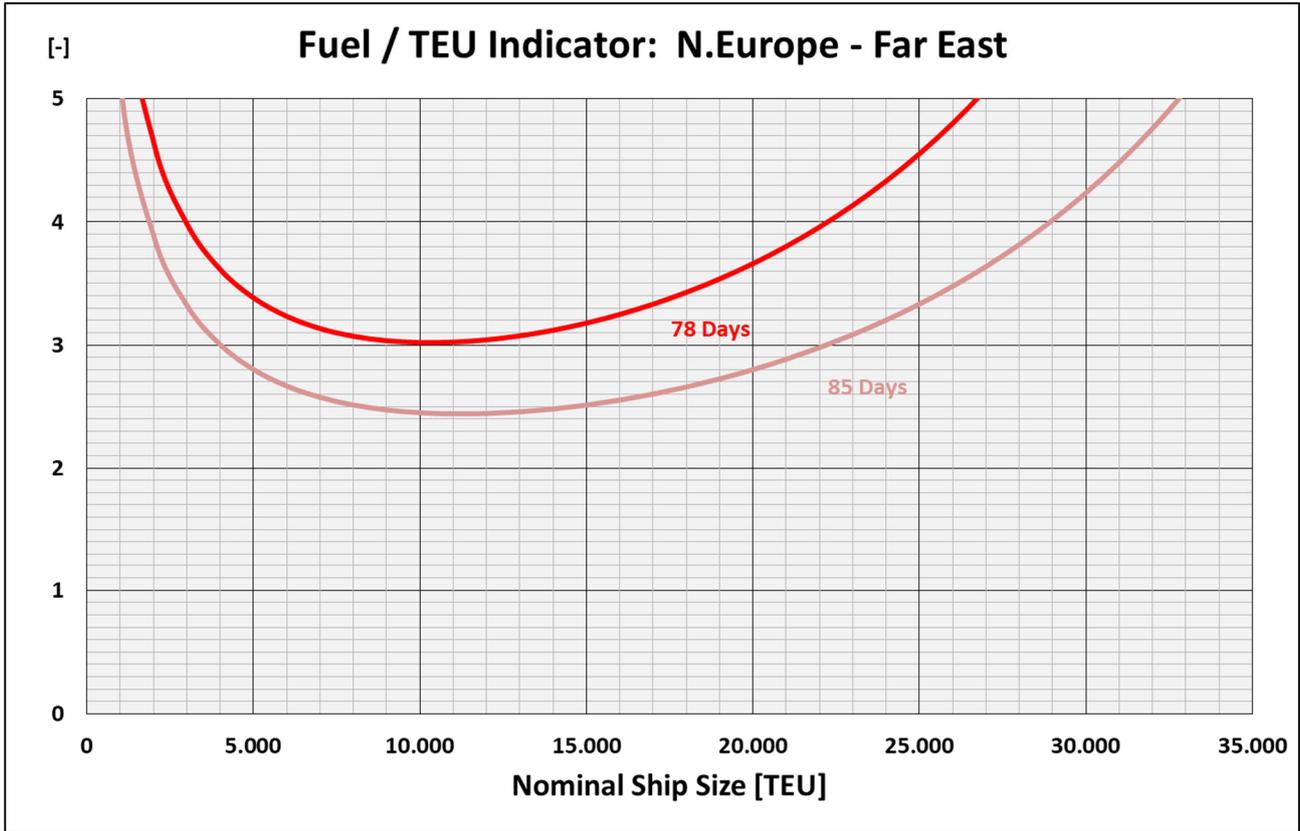


Abbildung 5

2.1 HERLEITUNG

Zur Bestimmung der Minimumstelle wird aus Gl. (22) die entsprechende Funktion gebildet, abgeleitet und auf Null gesetzt:

$$f(CC) = CC^{-0,479} (t_{round\ voyage} - k_i CC)^{-2} \quad (26)$$

$$f'(CC) = -0,479 CC^{-1,479} (t_{round\ voyage} - k_i CC)^{-2} + CC^{-0,479} 2 k_i (t_{round\ voyage} - k_i CC)^{-3} = 0 \quad (27)$$

$$0,479 CC^{-1,479} (t_{round\ voyage} - k_i CC)^{-2} = CC^{-0,479} 2 k_i (t_{round\ voyage} - k_i CC)^{-3} \quad (28)$$

$$\frac{0,479 CC^{-1,479}}{CC^{-0,479}} = 2 k_i (t_{round\ voyage} - k_i CC)^{-1} \quad (29)$$

$$CC^{-1} = \frac{2 k_i}{0,479} (t_{round\ voyage} - k_i CC)^{-1} \quad (30)$$

$$CC = \frac{0,479}{2 k_i} (t_{round\ voyage} - k_i CC) \quad (31)$$

$$CC = 0,2395 \frac{t_{round\ voyage}}{k_i} - 0,2395 CC \quad (32)$$

$$CC = \frac{0,2395}{1,2395} \frac{t_{round\ voyage}}{k_i} \quad (33)$$

$$CC_{fuel\ min} = 0,1932 \frac{t_{round\ voyage}}{k_i} \approx 0,2 \frac{t_{round\ voyage}}{k_i} \quad (34)$$

3 ERGEBNIS

Mit Hilfe der einfachen Gl. (34) lässt sich die optimale Schiffsgröße in Bezug auf die benötigte Brennstoffmenge sowie die daraus resultierenden CO₂-Emissionen pro TEU für jeden Liniendienst in Abhängigkeit von der Rundreisedauer (abzgl. der festen Revier- und Nebenzeiten) sowie der dort herrschenden Umschlagsproduktivität einfach abschätzen.

Für eine typische 12-wöchige N.Europa-Fernost-Rundreise mit $t_{round\ voyage} = 78\ days$ und dem Umschlagfaktor $k_{13.000} = 1,462 \times 10^{-3}\ days/TEU$ (s.o.) ergibt sich mit $CC_{fuel\ min} = 10.297\ TEU$ die rechnerisch exakte Schiffsgröße, bei der der "Fuel/TEU-Indicator" ein Minimum einnimmt.

Gem. Gl. (34) ist die Schiffsgröße bei der der "Fuel/TEU-Indicator" ein Minimum aufweist, sowohl proportional zu $t_{round\ voyage}$ als auch umgekehrt proportional zu k_i , d.h. sie ist proportional zur (vorgegebenen) Rundreisedauer (abzgl. der festen Revier- und Nebenzeiten) bzw. umgekehrt proportional zur benötigten durchschnittlichen reinen Umschlagszeit pro TEU:

$$CC_{fuel\ min} \sim t_{round\ voyage} \quad (35)$$

$$CC_{fuel\ min} \sim k_i^{-1} \quad (36)$$

Das bedeutet, dass sich die Minimumstelle in Richtung größerer Schiffe verschiebt je länger die "variablen" Bestandteile der Rundreise (für Umschlag und Seereise) sind und/oder je höher die Umschlagsproduktivität ist.

Wenn also die Rundreisedauer z.B. durch "slow steaming" auf 13 Wochen und damit um 9% verlängert würde, d.h. $t_{round\ voyage}' = t_{round\ voyage} - t_{coastal+waiting} = 91 - 6 = 85\ days$, so dass bei gleichbleibender Abfahrtsfrequenz und konstanter Transportkapazität auch ein 13. Schiff notwendig würde, reduzierte sich der Brennstoffbedarf pro TEU naturgemäß deutlich (Abbildung 5). Das rechnerische Minimum des "Fuel/TEU-Indicators" würde sich demnach bei einer ebenfalls um 9% erhöhten Schiffskapazität $CC_{fuel\ min} = 11.221\ TEU$ einstellen. Entsprechend geringer fiel es aus, wenn die Rundreisedauer verkürzt würde.

Auch bei einer Erhöhung der Umschlagsproduktivität verschöbe sich die in Bezug auf die benötigte Brennstoffmenge pro TEU "optimale" Schiffsgröße in Richtung größerer Schiffe. Würde die Umschlagszeit pro TEU z.B. halbiert, verdoppelte sich die "optimale Schiffsgröße".

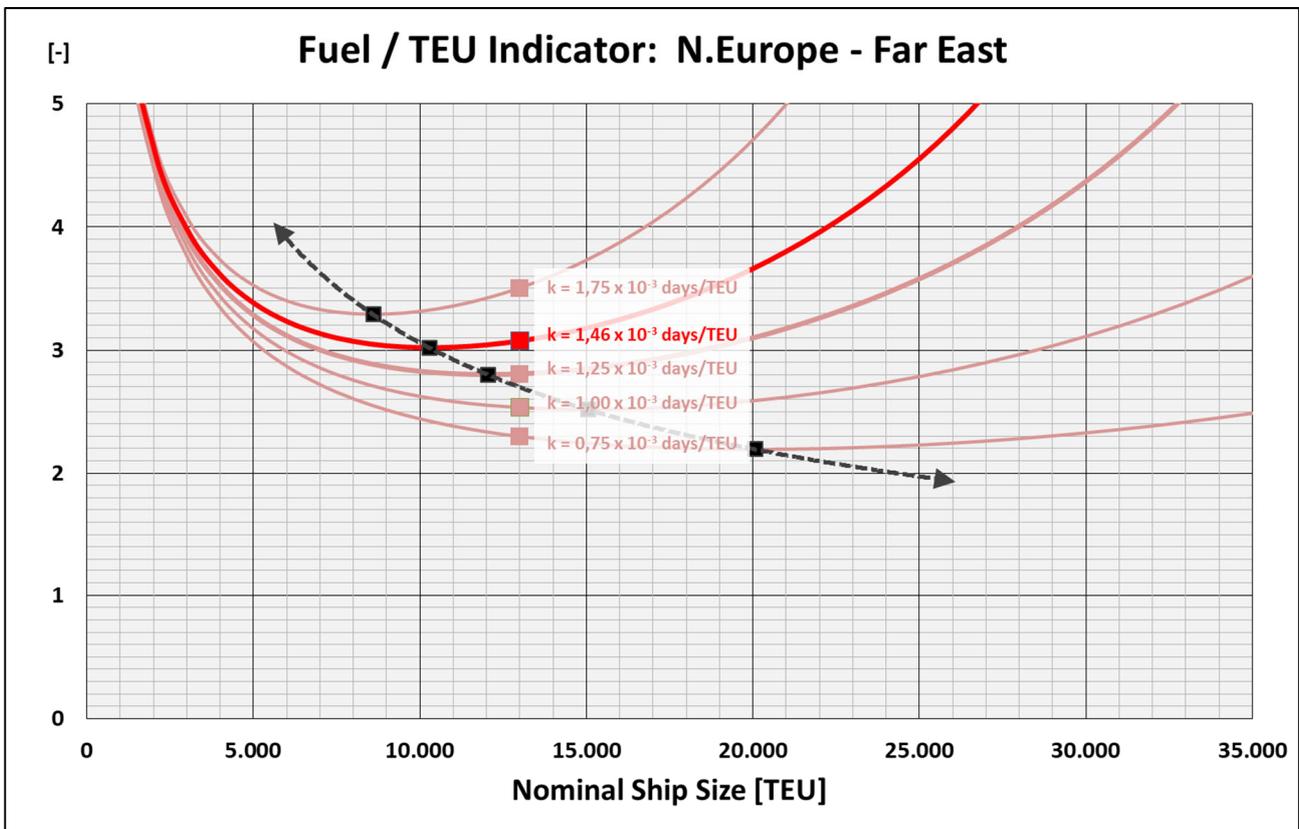


Abbildung 6

Im Vergleich zu ermittelten Umschlagfaktor $k_{13.000} = 1,462 \times 10^{-3} \text{ days/TEU}$ wird der Verlauf des "Fuel/TEU-Indicators" auch für beispielhafte $k_{13.000} = 0,75 \dots 1,75 \times 10^{-3} \text{ days/TEU}$ ermittelt (Abbildung 6). Es zeigt sich, dass eine erhöhte Umschlagsproduktivität den "Fuel/TEU-Indicator" deutlich absinken lässt, da somit auf See langsamer gefahren werden kann. Desweiteren verschiebt sich die "optimale" Schiffsgröße deutlich in Richtung größerer Schiffe und auch der Anstieg nach Durchlaufen der Minima ist umso flacher je höher die Umschlagsproduktivität ist.

Die gestrichelte Linie in Abbildung 6 verbindet die Minimumstellen. Kombinationen aus Schiffsgröße und Umschlagsproduktivität oberhalb dieser Linie ergeben unter dem Gesichtspunkt der spezifischen Brennstoffmenge bzw. den CO₂-Emissionen pro TEU demnach keinen Sinn!

Verblüffende Erkenntnis: Anstatt in einem N.Europa-Fernost-Dienst 20.000 TEU-Schiffe bei einer durchschnittlichen Umschlagsproduktivität von $k_i = 1,46 \times 10^{-3} \text{ days/TEU}$ einzusetzen, ist es unter den Gesichtspunkten der Brennstoffökonomie und des Klimaschutzes günstiger, mit der doppelten Anzahl von (langsameren) 10.000 TEU-Schiffen zu operieren (nebenher verbesserte sich dadurch auch die Servicequalität in Form einer verdoppelten Abfahrtsfrequenz)! Erst wenn ein Wert von $k_i = 0,75 \times 10^{-3} \text{ days/TEU} \approx 1 \text{ min/TEU}$ erreicht würde, machten demnach 20.000 TEU-Schiffe Sinn.

Dieser Wert für k_i entspricht bei einem angenommenen TEU-Faktor $TF = 1,6 \text{ TEU/Ctr}$ (und unter der Voraussetzung, dass keine Tandem- oder gar 4 TEU-Spreader zum Einsatz kommen) einer durchschnittlichen Umschlagsleistung am Schiff über alle Häfen von:

$$\frac{4 \frac{\text{moves}}{\text{Ctr}}}{1 \frac{\text{min}}{\text{TEU}}} \frac{60 \frac{\text{min}}{\text{hr}}}{1,6 \frac{\text{TEU}}{\text{Ctr}}} = 150 \frac{\text{moves}}{\text{hr}} \quad (37)$$

Würden z.B. durchgehend und überall 6 Brücken am Schiff eingesetzt, müsste jede Brücke in jedem Hafen demnach eine durchschnittliche Umschlagsrate $HR = 25 \text{ moves/hr}$ erzielen.

Von einem Terminal in Shanghai wurde kürzlich die größte jemals an einem Schiff umgeschlagene Containermenge gemeldet: Innerhalb von 62 Stunden wurden an einem 23.000 TEU-Schiff unter Einsatz von zeitweilig bis zu 11 Brücken 25.775 TEU umgeschlagen [15]. Bei einem angenommenen TEU-Faktor $TF = 1,6 \text{ TEU/Ctr}$ entspricht dies einer durchschnittlichen Umschlagsleistung von 260 moves/hr. Unter dem mutmaßlichen Einsatz von durchschnittlich 8 bis 10 Brücken betrug die Umschlagsrate damit: $HR = 32,5 \dots 26,0 \text{ moves/hr}$.

Die heute im N.Europa-Fernost-Verkehr eingesetzten gängigen Schiffsgrößen liegen mit den (vermuteten) Um-

schlagsfaktoren also deutlich oberhalb der gestrichelten Linie. Die gegenwärtig größten Schiffe von rund 24.000 TEU weisen bei einem aus aktuellen Fahrplandaten hergeleiteten Umschlagfaktor $k_{13.000} = 1,46 \times 10^{-3} \text{ days/TEU}$ demnach einen "Fuel/TEU-Indicator" auf, wie er auch bei Schiffen zu erwarten ist, die kleiner als 5.000 TEU (und langsamer) sind!

4 ERWEITERTE BETRACHTUNG

Neben der Brennstoffmenge pro TEU und den daraus resultierenden Kosten sowie den damit einhergehenden CO₂-Emissionen pro TEU interessieren den Schiffsbetreiber im Wesentlichen zwei weitere wichtige Kostenarten:

- Kapitalkosten pro TEU
- Schiffsbetriebskosten pro TEU (hauptsächlich Besatzungskosten)

Beide Kostenarten profitieren von im Grundsatz durchgehenden EoS-Effekten, d.h. dass keine gegenläufigen Effekte auftreten. Die entsprechenden Kurven werden allerdings in Richtung größerer Schiffe immer flacher. In [2] sind als "neutrale" Indikatoren für beide Kostenarten die Leerschiffsmasse pro TEU (f. Kapitalkosten) sowie die Besatzungsstärke pro TEU (f. Betriebskosten) eingeführt und hergeleitet worden. Diese Größen haben den Vorteil, dass sie nicht von dem aus dem jeweils aktuellen Marktgeschehen resultierenden Preis- und Zinsniveau oder Wechselkursparitäten beeinflusst und womöglich kaschiert werden. Es sind eindeutige Größen, die nicht verfälscht werden können, wobei die Daten zur Leerschiffsmasse eines Schiffes nicht ohne weiteres frei zugänglich sind. Angaben zur absoluten Besatzungsstärke sind nicht einmal erforderlich, da lediglich der reziproke Zusammenhang von Interesse ist, der besagt, dass sich die betreffenden spezifischen Kosten z.B. bei einer Verdoppelung der Container-Kapazität halbieren.

Alle drei Indikatoren lassen sich zu einem "Total Cost Indicator" zusammenfassen, wobei zunächst angenommen wird, dass die drei Kostenarten in einem Ausgangspunkt mit jeweils $\frac{1}{3}$ gewichtet sind, was nicht unrealistisch ist. Dieser Punkt wird willkürlich auf eine Schiffsgröße von 5.000 TEU (etwas größer als die früher im N.Europa-Fernost-Dienst üblicherweise eingesetzten Panamax-Schiffe) gesetzt und dergestalt normiert, dass jede Kostenart dort den Wert "1" einnimmt. Der Umschlagfaktor wird weiterhin mit $k_{13.000} = 1,46 \times 10^{-3} \text{ days/TEU}$ angesetzt. Sodann werden die drei Kurven addiert (Abbildung 7).⁴

⁴ Eine Normierung auf andere Schiffsgrößen ändert nichts an der Lage der Minima.

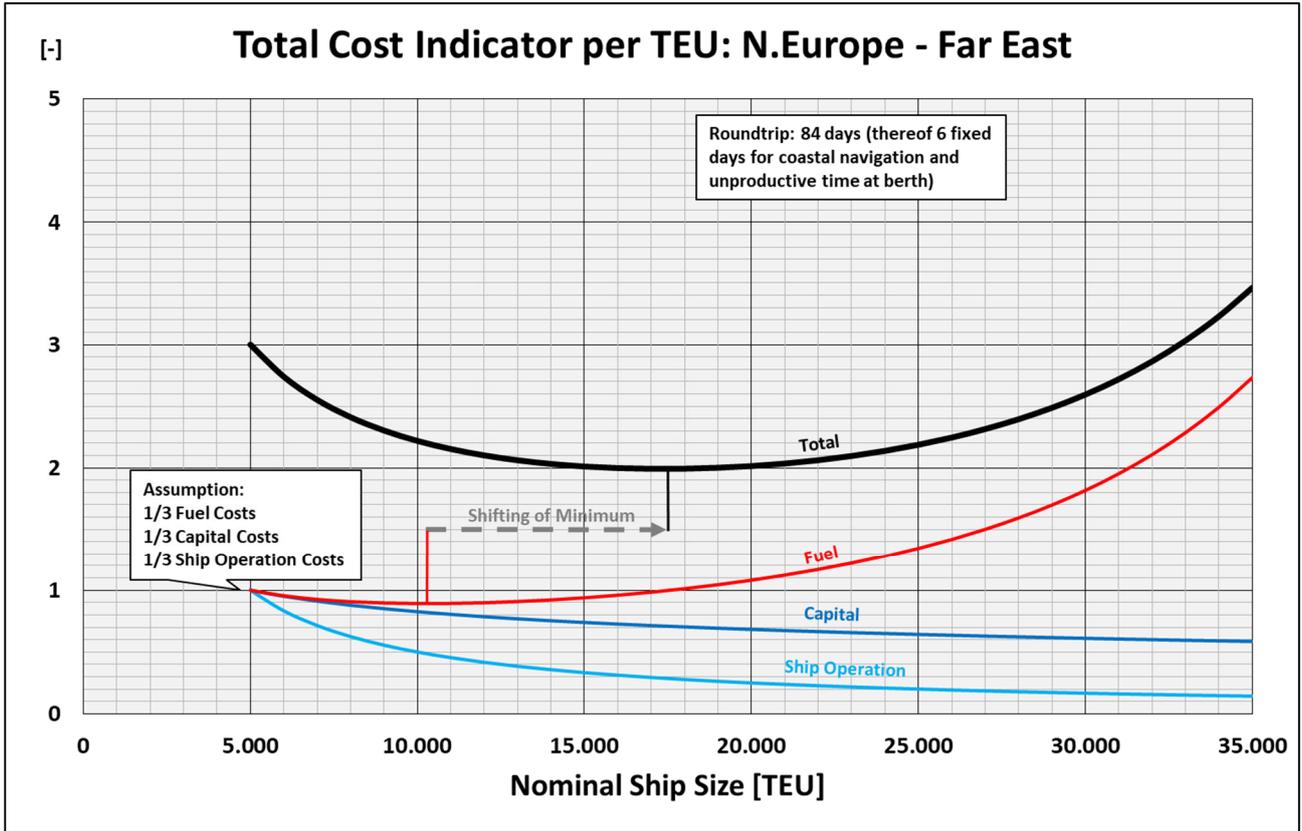


Abbildung 7

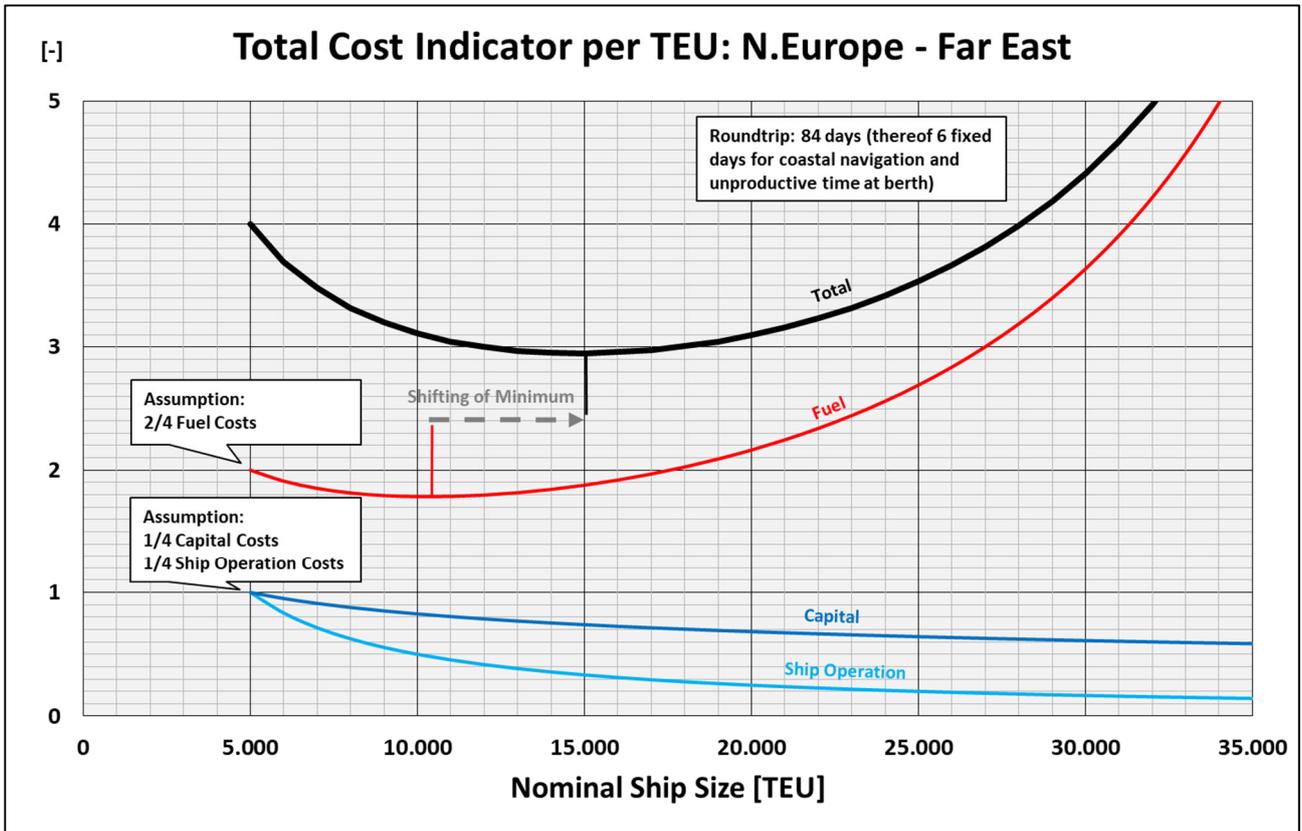


Abbildung 8

Für einen typischen N.Europa-Fernost-Dienst zeigt sich, dass unter o.g. Prämissen aus dem EoS-Effekt über alle Kostenarten, und damit auch in der Gesamtbetrachtung, bis zu einer Schiffsgröße von etwa 10.000 TEU eine anfänglich sehr starke Kostendegression resultiert. Ab ca. 17.500 TEU sind jedoch die Zuwächse des bereits ab 10.297 TEU wieder ansteigenden "Fuel/TEU-Indicators" (s.o.) größer als die immer schwächer werdende Abnahme bei den spezifischen Kapital- und Schiffsbetriebskosten, so dass in der Gesamtbetrachtung der "Total Cost Indicator" ab dort wieder ansteigt. Sollten die Brennstoffkosten im Ausgangspunkt tatsächlich einen größeren Anteil an den Gesamtkosten pro TEU ausmachen, z.B. weil sich der Brennstoffpreis verdoppelt, so dass der "Total Cost Indicator" nunmehr bei "4" startet und die Wichtung der Brennstoffkosten demzufolge von $\frac{1}{3}$ auf $\frac{1}{2}$ steigt, würde der "Total Cost Indicator" schon bei ca. 15.000 TEU sein Minimum erreichen (Abbildung 8). Umgekehrt gilt es entsprechend. Tatsächlich liegt der Anteil der Brennstoffkosten erfahrungsgemäß auch zwischen $\frac{1}{3}$ und $\frac{1}{2}$ [16].

4.1 ANDERE FAHRTGEBIETE

In dem ebenfalls untersuchten Fahrtgebiet über den Pazifik (Abbildung 9a) ist die Rundreisedauer deutlich kürzer ($t_{round\ voyage} = 38\ days$) während die Umschlagsproduktivität mit abgeleitetem $k_{8.500} = 1,2\ min/TEU$ höher ist (Tab. 1). Der Verlauf der Indikatoren für Kapital- und Schiffsbetriebskosten ist grundsätzlich fahrtgebietsunabhängig. Das Minimum des "Fuel/TEU-Indicators" befindet sich jedoch schon bei ca. 9.000 TEU. Insofern findet auch der "Total Cost Indicator" schon bei einer kleineren Schiffsgröße sein Minimum, das zudem auch noch höher liegt. Aufgrund der kürzeren Rundreisedauer steht weniger Zeit für die Kompensation längerer Hafenzeiten zur Verfügung, d.h. die Geschwindigkeitserhöhung und damit die benötigte Brennstoffmenge (mit kubischer Wirkung) muss größer sein.

Tabelle 1: Abgeschätzte Parameter der untersuchten Fahrtgebiete (Hapag-Lloyd) [10]

	CC [TEU]	$t_{round\ voyage}$ [days]	$t_{coastal+waiting}$ [days]	$t_{round\ voyage}'$ [days]	k [min/TEU]
N.Europe-Far East (FE2)	13.000	84	6	78	2,1
Transpacific (PS4)	8.500	42	4	38	1,2
North Atlantic (AL1)	4.500	35	4	31	3,2

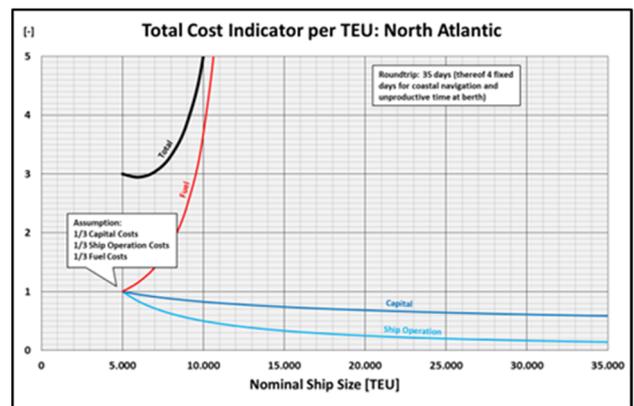
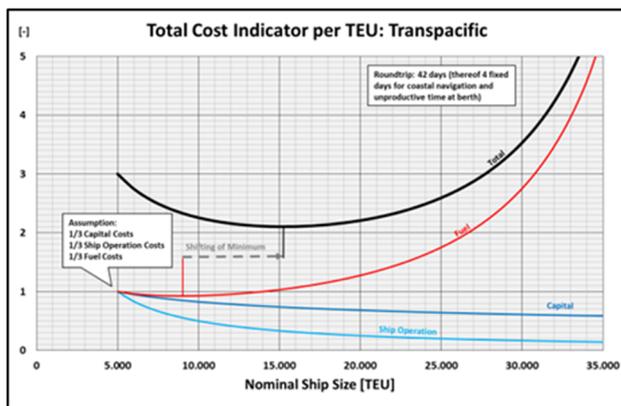


Abbildung 9 a+b

Drastischer ist es auf dem Nordatlantik, wo die Rundreisedauer noch kürzer ist und der Umschlag mit abgeleitetem $k_{4.500} = 3,2\ min/TEU$ insgesamt auch noch deutlich unproduktiver ist (Abbildung 9b). Infolgedessen befindet sich das Minimum des "Fuel/TEU-Indicators" noch unterhalb der Ausgangsgröße von 5.000 TEU, so dass das Minimum des "Total Cost Indicators" schon bei ca. 6.000 TEU nur knapp darüber liegt. Aufgrund der relativ kurzen Seezeit, müsste extrem beschleunigt werden, um die größtenbedingt längere Umschlagszeiten zu kompensieren. Der "Fuel/TEU-Indikator" steigt so steil

an, dass die technische Machbarkeit überhaupt in Frage steht, denn aus den erforderlichen Geschwindigkeiten würden benötigte Antriebsleistungen resultieren, deren Raumbedarf allein schon gänzlich andere Schiffe erfordern würde (s. Diskussion #14)!

5 ERKENNTNISSE

1. Das Wachstum der Schiffsgrößen führt anfänglich zu signifikanten EoS-Effekten hinsichtlich:
 - Kapitalkosten pro TEU
 - Schiffsbetriebskosten pro TEU
 - Brennstoffkosten pro TEU
2. Die kumulierte Umschlagszeit wächst grundsätzlich mindestens proportional zur Schiffsgröße. Grund dafür ist, dass die einhergehende Vergrößerung des Hauptspantquerschnittes (inkl. des Deckstaubereiches) den durchschnittlichen Weg der Container beim Umschlag deutlich verlängert und die Anzahl der stellbaren Brücken nur unterproportional mit der Containerkapazität wächst, nämlich nur proportional zur Schiffslänge. Wenn nicht genügend Containerbrücken für die längeren Schiffe zur Verfügung stehen, wächst die Umschlagszeit sogar überproportional.
3. Die längere proportional zur Containerkapazität wachsende kumulierte Umschlagszeit hat zur Folge, dass auf See schneller gefahren werden muss, um die Rundreisedauer und die Abfahrtsfrequenz zu halten. In Bezug auf die benötigte Brennstoffmenge wirkt zwar grundsätzlich der EoS-Effekt aber gleichzeitig steigt der Brennstoffverbrauch mit der 3. Potenz der steigenden Geschwindigkeit. Beide Effekte heben sich ab einer bestimmten Schiffsgröße auf. An diesem Punkt erreicht der Brennstoffbedarf und damit auch der "Carbon Footprint" pro TEU sein Minimum. Für noch größere Schiffe steigen beide Größen wieder an, d.h. **der EoS-Effekt ist hinsichtlich Brennstoffbedarf und "Carbon Footprint" pro TEU endlich!** Insofern ist auch ein immer wieder vorgetragener "*Ecologies-of-Scale-Effekt*" gleichermaßen limitiert. Erst bei einer theoretisch denkbaren sehr hohen Umschlagsproduktivität $k_i < 0,75 \times 10^{-3} \text{ days/TEU}$ wandert die Minimumstelle in einen Bereich $CC_{fuel\ min} = 24.000 \text{ TEU}$.
4. Die optimale Schiffsgröße in Bezug auf die benötigte Brennstoffmenge bzw. den "Carbon Footprint" pro TEU hängt von nur zwei Parametern eines Liniendienstes ab:
 - Rundreisedauer abzüglich der festen Revier- und Nebenzeiten des Umschlages
 - Vorherrschende Umschlagsproduktivität ("Umschlagfaktor")
5. Die Lage des Minimums lässt sich mit Hilfe von Gl. (34) unter Verwendung der o.g. Parameter einfach berechnen.
6. Je höher die Umschlagsproduktivität, desto geringer fällt der "Fuel/TEU-Indicator" aus, umso weiter verschiebt sich sein Minimum in Richtung größerer Schiffe und desto flacher ist der Wiederanstieg der Kurve nach Durchlaufen des Minimums. Mit dem Wachstum der Schiffsgrößen steigen die Anforderungen an die Umschlagsproduktivität daher rapide an. Ohne eine hohe Umschlagproduktivität macht der Einsatz von ULCS im Hinblick auf den Brennstoffverbrauch bzw. den "Carbon Footprint" pro TEU keinen Sinn! Je größer die Schiffe werden, desto wichtiger wird die Umschlagsproduktivität.
7. Werden auch die Kapitalkosten pro TEU sowie die Kosten des Schiffsbetriebes pro TEU (hauptsächlich Besatzungskosten) berücksichtigt, die im Gegensatz zur benötigten Brennstoffmenge grundsätzlich von einem durchgängigen EoS-Effekt profitieren, stellt sich auch in der Gesamtbetrachtung ein Minimum ein, das allerdings in Richtung größerer Schiffe wandert, d.h. **der EoS-Effekt ist auch im Hinblick auf die Gesamtkosten pro TEU endlich!**
8. Es gibt für jeden Liniendienst eine optimale Schiffsgröße sowohl im Hinblick auf den spezifischen Brennstoffbedarf bzw. "Carbon Footprint" pro TEU als auch im Hinblick auf die Summe der wesentlichen Kostenarten pro TEU. Die Punkte sind nicht deckungsgleich. Das Minimum der benötigten Brennstoffmenge bzw. des "Carbon Footprints" liegt stets bei kleineren Schiffsgrößen als das Minimum der Gesamtkosten.
9. Die Lage des Minimums der Gesamtkosten pro TEU wird von vier Einflüssen bestimmt:
 - Kurvenverlauf der benötigten Brennstoffmenge pro TEU über die Containerkapazität
 - Kurvenverlauf des Leerschiffsmasse pro TEU über die Containerkapazität (als Synonym für den "neutralisierten" Kapitalbedarf pro TEU)
 - Kurvenverlauf der Besatzungsstärke pro TEU über die Containerkapazität (als Synonym für die gesamten "neutralisierten" Schiffsbetriebskosten pro TEU)
 - Wichtung der drei Kurven

10. Je größer die Wichtung der benötigten Brennstoffmenge pro TEU, desto mehr verschiebt sich das Minimum der Gesamtkosten in Richtung kleinerer Schiffsgrößen.
11. Je kürzer die beeinflussbaren Zeiten einer Rundreise und je langsamer der Umschlag desto steiler die ansteigenden Kurven für die benötigte Brennstoffmenge. Umso enger ist damit der Bereich vernünftig einsetzbarer Schiffsgrößen.
12. In den untersuchten Fahrtgebieten über den Pazifik und den Nordatlantik entsprechen die aktuell eingesetzten Schiffgrößen ungefähr dem Minimum in Bezug auf die Brennstoffmenge und liegen damit zwangsläufig unterhalb des Minimums in Bezug auf die Gesamtkosten. Die mit rd. 24.000 TEU aktuell größten im N.Europa-Fernost-Verkehr eingesetzten Schiffe übersteigen jedoch deutlich die für die Gesamtkosten optimale Größe und damit umso mehr diejenige für den Brennstoffbedarf bzw. den "Carbon Footprint". Der "TEU/Fuel Indicator" eines 24.000 TEU-Schiffes entspricht bei aktueller Umschlagsproduktivität dem eines entsprechend langsamer fahrenden Schiffes, das kleiner als 5.000 TEU ist.
13. Mit steigender Schiffsgröße wird zwar mehr Kapazität mit derselben Schiffsanzahl zur Verfügung gestellt werden, aber ab einem gewissen Punkt insgesamt zu höheren Kosten pro TEU.
14. Durch Erhöhung der Rundreisedauer lässt sich die optimale Schiffsgröße in Richtung größerer Schiffe verschieben. Allerdings werden damit mehr Schiffe erforderlich, um dieselbe Transportkapazität und Abfahrtsfrequenz zu bieten, d.h. Kapital- und Schiffsbetriebskosten pro TEU bzw. in Bezug auf die insgesamt vorgehaltene Transportkapazität steigen entsprechend.

6 DISKUSSION

Die vorliegende Untersuchung basiert auf dem Zusammenwirken von einigen grundlegenden geometrischen und physikalischen Zusammenhängen, aus denen allgemeingültige Proportionalitäten abgeleitet werden. Durch die Verwendung von nicht monetären Größen als Grundlage für einen entsprechenden Kostenverlauf für Brennstoff, Investition und Betrieb lässt sich ein "neutraler" Aufwand ausweisen, der frei ist von "kommerziellen Zufälligkeiten", wie z.B. Marktpreisen, Währungsparitäten, Mengenrabatten, Zinsniveau oder gar dem Verhandlungsgeschick.

Der Ausweis eines dimensionslosen "Fuel/TEU-Indicators" erlaubt die gesuchten Rückschlüsse auf die

Größenabhängigkeit des spezifischen Brennstoffbedarfs und des damit einhergehenden "Carbon Footprints" ohne dass aufwändige individuelle Verbrauchsberechnungen für diverse Schiffe unter diversen Umständen und diversen Annahmen vorgenommen werden müssen.

Die Zusammenführung des "Fuel/TEU-Indicators" mit den Indikatoren für Kapital- und Schiffsbetriebskosten über eine Normierung und (willkürliche) Wichtung zu einem dimensionslosen "Total Cost Indicator" erlaubt das Erkennen von grundsätzlichen Zusammenhängen zwischen Schiffsgröße und Wirtschaftlichkeit.

Folgende Vereinfachungen sind vorgenommen worden und sollen bewertet werden:

1. Stets volle Schiffe

Ogleich aktuell Realität, ist langfristig natürlich nicht davon auszugehen. Ein angenommener Auslastungsgrad wäre jedoch als fester Faktor anzusehen und würde in der Proportionalitätsbetrachtung wieder herausfallen.

2. Kein "Wayport Cargo" sowie Umstauer berücksichtigt

Entsprechende Umschlagsvorgänge würden die Umschlagsdauer weiter erhöhen und tendenziell noch höhere Geschwindigkeiten auf See zum Ausgleich erfordern, d.h. die Minima in Richtung kleinerer Schiffe verschieben.

3. "Eckige" Bahnkurve beim Umschlag

Da in der Untersuchung alle Container über alle Schiffsgrößen "eckig" umgeschlagen werden, entsteht kein relativer Fehler.

4. Feste Umschlagsprämissen

Selbst wenn die Prämissen hinsichtlich Absetzpunkt und Bahnkurve nicht der Praxis entsprechen, würde bei konsequenter Anwendung kein relativer Fehler entstehen.

5. Durchschnittlicher Umschlagsweg der Container für das gesamte Schiff als festes Verhältnis (98%) zum entsprechenden Wert aus dem Hauptspantquerschnitt

Das Verhältnis mag bei besonderen Containerschiffstypen abweichen. Der Fehler wird jedoch minimal sein.

6. Annahme stetiger Funktionen

Die Anzahl der stellbaren Containerbrücken über die Schiffslänge wächst in der Realität nicht stetig, sondern in Stufen. Auch die Schiffslänge

selbst wächst nicht stetig mit der Containerkapazität. Um allgemeingültige Zusammenhänge zu erkennen, wird jedoch von stetigen Zusammenhängen ausgegangen.

7. Positionierzeiten unberücksichtigt

Einen Teil der reinen Umschlagszeit betrifft das Positionieren der Container bzw. des Spreaders. Der betreffende Zeitbedarf ist unabhängig vom zurückgelegten Weg. Nach Kunzmann belaufen sich die Positionierzeiten auf 10 bis 25s pro Umschlagsvorgang. Kunzmann hatte schon vor Jahren durch Messungen festgestellt hat, dass die Positionierzeiten für an Deck gestaute Container sowohl beim Laden als auch beim Löschen länger sind als für im Laderaum gestaute Container [17]. Die zusätzliche Berücksichtigung der Positionierzeiten in $t_{container\ handling}$ hätte jedoch keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn gebracht und Gl. (5) sowie Gl. (34) nicht in Frage gestellt.

8. Unberücksichtigte Lukendeckelbewegungen

In erster Näherung wird angenommen, dass die Anzahl der Lukendeckel proportional zur Containerkapazität eines Schiffes ist. Insofern können sie nicht in den per Definition größenunabhängigen Nebenzeiten subsummiert werden, sondern müssten in $t_{container\ handling}$ enthalten sein. Gl. (9) müsste eigentlich um einen entsprechenden (konstanten) Faktor erweitert werden, wodurch aber die Gültigkeit von Gl. (10) nicht in Frage gestellt wird.

9. Verwendung von Regressionsgleichungen

Die ermittelten vier Regressionsgleichungen für...

- Umschlagsweg = f (Containerkapazität)
- Schiffslänge = f (Containerkapazität)
- Displacement = f (Containerkapazität)
- Leerschiffsmasse = f (Containerkapazität)

...als Funktion der Containerkapazität eines Schiffes sind die Basis der Untersuchung. Sie sind aus einem Datenfundus von zahlreichen Schiffen ermittelt worden und weisen entweder eine hohe Regressionsgüte auf (und bilden damit die geometrischen und physikalischen Zusammenhänge gut ab) oder mussten aus offensichtlichen Grund (zulässig) angepasst werden.

10. Anwendung der Admiraltätsformel

Die Admiraltätsformel wird im schiffbaulichen Vorentwurf für Näherungsrechnungen ver-

wendet. Sie dient nicht der exakten Bemessung der Antriebsleistung. In ihr sind jedoch die entscheidenden Abhängigkeiten der Antriebsleistung von der 3. Potenz der Geschwindigkeit sowie der EoS-Effekt in Bezug auf die unterproportional zum Displacement steigende Antriebsleistung vereint. Die 3. Potenz der Geschwindigkeit entstammt der physikalischen Reibungstheorie. Bei höheren Geschwindigkeiten, bzw. bei höheren Froude-Zahlen ($Fn = v/\sqrt{g LPP}$), nimmt jedoch der Anteil des Wellenwiderstandes im Verhältnis zum Reibungswiderstand deutlich zu. Daher ist der Exponent in der Praxis tatsächlich noch größer als "3". Insofern hat Völker schon vor Jahren eine "Neue Admiraltätsformel" formuliert, die gegenüber der traditionellen Formel einen kleineren Streubereich aufweist [14] (S. 311):

$$P = \frac{\Delta^{0,567} v_0^{3,6}}{C_{Admiral}} \quad (38)$$

Mit den modifizierten Exponenten in der Formel nach Völker ist sowohl der Einfluss der Geschwindigkeit größer als auch der EoS-Effekt stärker. Die Kurve des "Fuel/TEU-Indicators" würde daher "wannenförmiger". Der grundsätzliche Kurvenverlauf bliebe jedoch erhalten.

11. Proportionalität von Brennstoffverbrauch und Antriebsleistung

Im Bereich 70...85% MCR kann der spezifische Brennstoffverbrauch [g/kWh] bei langsamlaufenden 2-Takt-Motoren näherungsweise als konstanter Proportionalitätsfaktor (ca. ± 1,5%) für diese Relation herangezogen werden. Die Hauptmaschinen von Containerschiffen werden üblicherweise rd. 75% ihrer Betriebszeit in diesem Bereich betrieben [18].

12. Brennstoffmenge während der festen Revierzeiten

Streng genommen müsste auch noch die Brennstoffmenge berücksichtigt werden, die während der festen Revierzeiten verbraucht wird und (bei vorgegebener Geschwindigkeit) vollumfänglich von dem (allerdings abflachenden) EoS-Effekt profitiert. Die Kurve in Abbildung 5 wäre insgesamt also ein wenig höher und das Minimum ein wenig nach rechts verschoben. Für eine typische N.Europa-Fernost-Rundreise mit 4 bis 5 Tagen Revierfahrt (bei üblicherweise gedrosselter Maschinenleistung) ggü. 59 Tagen auf See wäre der relative Fehler hinsichtlich der Lage des Minimums jedoch marginal.

13. Unberücksichtigte Brennstoffmenge für den Hilfsbetrieb

Die nicht unerhebliche Brennstoffmenge, die die Hilfsdiesel i.W. für die Kühlcontainer benötigen, ist für die Berechnung des Minimums irrelevant, da sie pro Kühl-TEU als konstant angesehen werden kann. Das gilt auch für eine reduzierte Zeit auf See, da bei konstanter Rundreisedauer im Gegenzug die Zeit im Hafen zunimmt, währenddessen die Container auch gekühlt werden müssen (möglicherweise nutzbare Landanschlüsse bleiben hierbei unberücksichtigt).

14. Wachsende Maschinenanlage

Mit deutlich größer werdender Antriebsleistung wachsen auch die Abmessungen und die Masse der Antriebsanlage. Es ist Teil des EoS-Effektes, dass bei konstanter Geschwindigkeit ihr Anteil an Masse und Raumbedarf bei steigender Schiffsgröße abnimmt. Mit steigender Geschwindigkeit ist dies jedoch nicht mehr der Fall. Je nach Ausmaß der Steigerung würden sich dadurch die Containerkapazität als auch die Tragfähigkeit reduzieren. Dieser Effekt ist hier noch gar nicht berücksichtigt und würde die Minima deutlich weiter in Richtung kleinerer und langsamerer Schiffe verschieben. Dadurch würden auch die Kapitalkosten pro TEU mit doppeltem Effekt steigen: Das Schiff würde sich als Ganzes verteuern – bei zusätzlich auch noch reduzierter Containerkapazität. Entsprechend wäre der Kurvenverlauf der Kapitalkosten pro TEU auch keine Asymptote mehr – mit entsprechender Auswirkung auf den "Total Cost Indicator". Dieser Effekt der (deutlich) höheren Geschwindigkeit ist vorliegend noch gar nicht berücksichtigt. Dennoch lässt sich demnach festhalten, dass die dargestellten "Indicator-Kurven" die großen Schiffe tatsächlich noch begünstigen.

15. Keine Berücksichtigung der Hafenkosten

Ein Großteil der Hafenkosten bezieht sich auf den Umschlag der Container und ist damit ohnehin schiffsgrößenunabhängig. Daher ist deren Nichtberücksichtigung unproblematisch. Alle schiffsbezogenen Hafengebühren basieren meist auf der Bruttovermessung, die jedoch in einem praktisch linearen Zusammenhang zur Containerkapazität steht, so dass sich diesbezüglich keine EoS-Effekte einstellen [16]. Lediglich wenn z.B. Liegeplatzgebühren auf der Schiffslänge beruhen oder gar Rabatte für ULCS gewährt werden (was in einigen Häfen tatsächlich der Fall ist), würden diesbezügliche EoS-Effekte zum Tragen kommen.

16. Willkürliche Wichtung

In der Tat ist die Wichtung der drei Größen mit einem Beitrag von je $\frac{1}{3}$ zu den Gesamtkosten willkürlich (aber nicht unrealistisch), wie auch der normierte Ausgangspunkt von 5.000 TEU willkürlich gewählt ist (was aber für die Lage der Minima unerheblich ist). Mit der ebenso vorgenommenen Wichtung von $\frac{1}{2}$ für den Brennstoffbedarf pro TEU lässt sich die Bandbreite der Lage möglicher Gesamt-Minima jedoch einigermaßen realistisch abschätzen. Mit den hergeleiteten Zusammenhängen lässt sich jede individuelle Wichtung an jedem gewählten Ausgangspunkt für einen konkreten Liniendienst vornehmen – mit entsprechend individuellen Schlüssen.

Die gewonnenen theoretischen Erkenntnisse beruhen auf der Analyse und Kombination einfacher geometrischer und physikalischer Effekte und lassen unter Anwendung obiger Vereinfachungen dennoch allgemeingültige Aussagen zu. Eine konkrete klimarelevante Erkenntnis ist z.B., dass Schiffsgrößen von 24.000 TEU im Hinblick auf den "Carbon Footprint" pro TEU (bei üblicher Umschlagsproduktivität) viel zu groß sind! Zwei 12.000 TEU-Schiffe, die bei unveränderter Rundreisedauer entsprechend langsamer fahren würden, wären deutlich klimafreundlicher! Sie hätten auch logistische Vorteile: Doppelte Abfahrtsfrequenz und geringere "Peak Loads" auf den Terminals. Aber auch hinsichtlich der Gesamtkosten erscheinen 24.000 TEU bereits deutlich zu groß. Diese Erkenntnisse stehen natürlich unter dem Vorbehalt einer genauen Berechnung für einen konkreten Liniendienst unter Berücksichtigung der tatsächlichen Stufen im Schiffsentwurf, Zeitanteile, Umschlagsproduktivität, Kosten und deren realer Wichtung. Aber allein die Erkenntnis, dass schon in der Theorie auch in Bezug auf die Gesamtkosten über die Schiffsgröße ein Minimum existiert, lässt ein genaues Nachrechnen mit den konkreten Werten umso gebotener erscheinen.

LITERATUR

- [1] Malchow, U.: *Schiffsgrößenwachstum: Fluch der Economies of Scale?*, in: 11. Hamburger Hafentag der Deutschen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft e.V., 2015
- [2] Malchow, U.: *Der Fluch der »Economies of Scale«*, HANSA, 8-2015
- [3] Malchow, U.: *Es geht um Hamburg*, HANSA, 3-2017
- [4] Malchow, U.: *Größenwachstum von Containerschiffen – eine kritische Reflexion*, HANSA, 7-2014
- [5] Malchow, U.: *XXL-Containerschiffe – eine kritische Reflexion*, Internationales Verkehrswesen, pp. 40-43, Juni 2018
- [6] Merk, O.: *The Impact of Mega-Ships*, OECD/ITF, Paris, 2015.
- [7] Ge, J.; Zhu, M.; Sha, M.; Notteboom, T.; Wenming, S.; Xuefeng, W.: *Towards 25,000 TEU vessels? A comparative economic analysis of ultra-large containership sizes under different market and operational conditions*, Maritime Economics & Logistics, Volume 23, Issue 4, 2021
- [8] N.N.: *The 'gigamax': Would a 'post-megamax' ship make any sense?*, Alphaliner 2021-22
- [9] Rasewsky, C.: *Economies of Scale from Post Megamax Container Vessels* (Excerpt), Hamburg, 2021
- [10] Hapag-Lloyd AG, *Fahrplandaten*, www.hapag-lloyd.com, Zugriff: 9. Juli 2021
- [11] Lai, B.: *Challenges and Solutions dealing with larger Container Vessels - the Perspective of a Terminal Operator*, in: IAPH-Kongress, Hamburg, 2015
- [12] Abramowski, T.; Cepowski, T.; Zvolenský, P.: *Determination of Regression Formulas for Key Design Characteristics of Container Ships at preliminary Design Stage*, New Trends in Production Engineering, Bd. 1, pp. 247-257, 2018
- [13] Park, N. K.; Suh, S. C.: *Tendency toward Mega Containerships and the Constraints of Container Terminals*, Journal of Marine Science and Engineering, no. 7, 131, 2019.
- [14] Schneekluth, H.: *Hydromechanik zum Schiffsentwurf*, Koehler, Herford, 1988.
- [15] N.N.: *SIPG claims a record*, World Cargo News, October 2021
- [16] Garrido, J.; Saurí, S.: *Predicting the Future Capacity and Dimensions of Container Ships*, Semantic Scholar, 23 June 2020
- [17] Kunzmann, M.: *Ein Beitrag zur Optimierung des Containerumschlages in Seehäfen beim Einsatz freibeweglicher Flurfördergeräte*, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1988
- [18] MAN Energy Solutions: *Propulsion of 14,000 TEU container vessels* (Firmenbroschüre), Copenhagen, undatiert.
- [19] Malchow, U.: *Growth in containership sizes to be stopped?*, Maritime Business Review Vol. 2, 2017

Dr.-Ing. Ulrich Malchow, geb. 1963 in Hamburg, vormals: Professor für "Maritime Economics", Hochschule Bremen, Centre of Maritime Studies

Adresse: c/o PORT FEEDER BARGE, Grosse Elbstrasse. 42, 22767 Hamburg, Telefon: +49 40 4016767-1, E-Mail: malchow@portfeederbarge.de