

## Abstract

Angesichts der immensen Bedeutung der Schifffahrt für den Welthandel und den erheblichen Umweltauswirkungen steht die gesamte Branche vor der Herausforderung, nachhaltige Lösungen zu finden. Diese Arbeit untersucht die Potenziale von **Slow Steaming** und der **alternativen Treibstoffe** LNG (Liquefied Natural Gas), Wasserstoff, Methanol und Ammoniak) in Bezug auf die Erreichung von Klimaneutralität in der internationalen Containerschifffahrt. Dabei wurden Daten aus einer gründlichen Literaturrecherche mit Daten aus dem operativen Betrieb eines Containerschiffs kombiniert und die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der Lösungsansätze quantifiziert, bewertet und abschließend ausgewertet. Es werden also sowohl die ökologische Seite in Form von Emissionen, als auch die wirtschaftliche Seite in Form von längeren Lieferzeiten, dem Verlust von TEU-Stellplätzen und Kosten betrachtet. Aus den Ergebnissen werden daraufhin Handlungsempfehlungen abgeleitet, um die Reedereien bei den bevorstehenden Entscheidungen im Hinblick auf die richtigen Antriebsformen und Maßnahmen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen bestmöglich zu unterstützen.

Mit Hilfe von Slow Steaming (Praxis bei der die Geschwindigkeit von Schiffen bewusst verringert wird, um Treibstoff, Kosten und Emissionen zu sparen) und insbesondere von bestimmten alternativen Treibstoffen (allen voran e-Methanol, aber auch e-Ammoniak) kann in der internationalen Containerschifffahrt mittel- bis langfristig Klimaneutralität geschaffen werden, sofern genügend grüne Treibstoffe produziert werden und die Infrastruktur entsprechend ausgebaut wird.

Trotz der Beschränkung auf die Betrachtung der internationalen Containerschifffahrt können die Ergebnisse der Arbeit für die gesamte Schifffahrt von Nutzen sein.

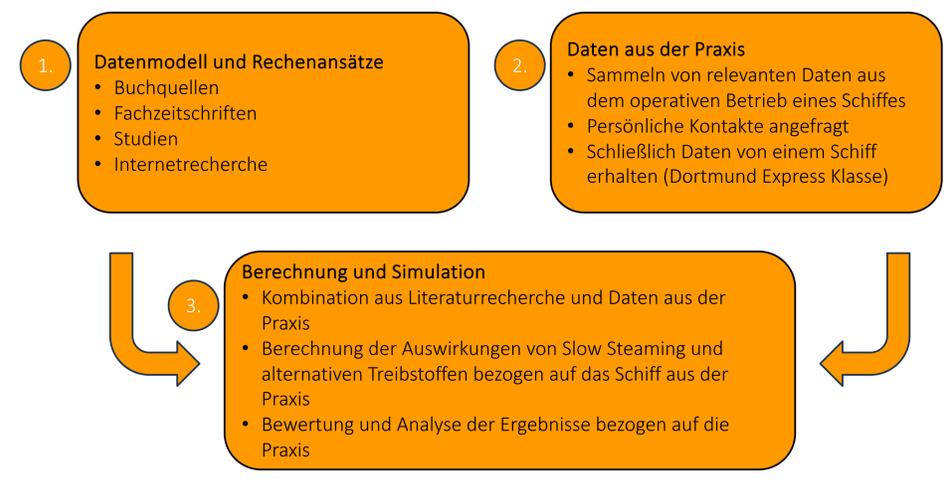
## Aufgabenstellung

Die zentrale Aufgabe der Bachelorarbeit bestand darin, die Potenziale von Slow Steaming und alternativen Treibstoffen (LNG, Wasserstoff, Methanol und Ammoniak) zur Erreichung von Klimaneutralität in der internationalen Containerschifffahrt zu untersuchen und folgende Hauptfragestellung zu beantworten:

**Können Slow Steaming und alternative Treibstoffe effektiv zur Erreichung von Klimaneutralität in der internationalen Containerschifffahrt beitragen?**

Neben den ökologischen Faktoren sollten insbesondere auch die ökonomischen Faktoren, wie TEU-Stellplatzverlust, oder verlängerte Lieferzeiten betrachtet werden. Dazu wurden Vorteile und Herausforderungen von Slow Steaming und der alternativen Treibstoffe identifiziert und analysiert. Anschließend wurden sowohl die ökonomischen als auch die ökologischen Auswirkungen dieser beiden Ansätze quantifiziert, gegenübergestellt und verglichen, um Ökonomie und Ökologie in Einklang zu bringen. Dies geschah mittels Daten aus dem operativen Betrieb eines Containerschiffes der Dortmund Express Klasse von Hapag-Lloyd in Kombination mit Daten aus der Literatur. Es ging also darum, die Auswirkung der beiden Ansätze bezogen auf den **Carbon Footprint** und die **wirtschaftlichen Auswirkungen** zu analysieren. Abschließend wurden Handlungsempfehlungen für Reedereien entwickelt, die die Auswahl und Implementierung geeigneter Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen unterstützen.

## Lösungsansatz und Methodik

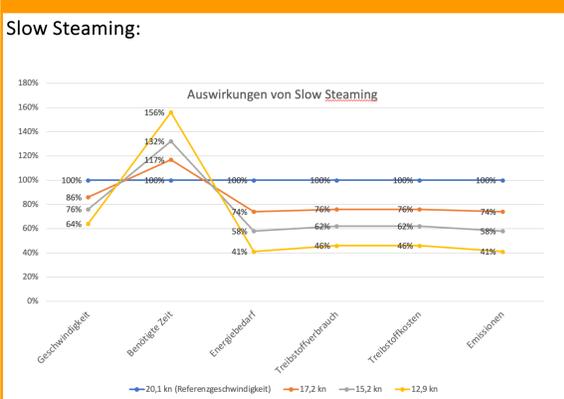


**Datenmodell und Rechenansätze:** Um den aktuellen Stand der Wissenschaft bestmöglich in die Arbeit einbeziehen zu können und verschiedene Rechenansätze zu gewinnen, wurde eine ausführliche Literaturrecherche betrieben. Hierbei wurde vorhandene wissenschaftliche Literatur und zahlreiche Studien analysiert, um einen umfangreichen Überblick über die bisherige Forschung zu geben.

**Daten aus der Praxis:** Neben der Literaturrecherche wurden Daten aus der Praxis beschafft, um einen möglichst nahen Praxisbezug herzustellen, so dass die Handlungsempfehlungen auch aussagekräftig für die Praxis sind und nicht rein auf Theorie basieren.

**Berechnung und Simulation:** Bei den Berechnungen wurden immer CO<sub>2</sub>-äquivalente (CO<sub>2e</sub>) Emissionen auf Well-to-Wake Basis betrachtet. Es wurden also sowohl die CO<sub>2</sub>-Emissionen, als auch die Methan- und Distickstoffmonoxid-Emissionen von der Quelle bis zur Verwendung des jeweiligen Treibstoffes betrachtet, um ein möglichst umfassendes Gesamtbild zu kreieren. Die Berechnungen erfolgten auf Basis zahlreicher Parameter aus Praxis und Literatur und kombinierten somit den theoretischen Teil mit dem praktischen Teil. Zu diesen Parametern zählen u.a. SFOC (Specific Fuel Oil Consumption), Geschwindigkeit, Maschinenleistung, die volumen- und massebezogenen Energiedichten und Emissionsfaktoren der Treibstoffe. Mit Hilfe der verschiedenen Berechnungen wurden die ökologischen, aber auch die ökonomischen Aspekte quantifiziert, um sie im weiteren Verlauf aus- und bewerten zu können. Der Berechnung und Simulation liegt jeweils die Betrachtung der für Containerschiffe typischen Route zwischen Rotterdam und Shanghai zugrunde.

## Ergebnisse

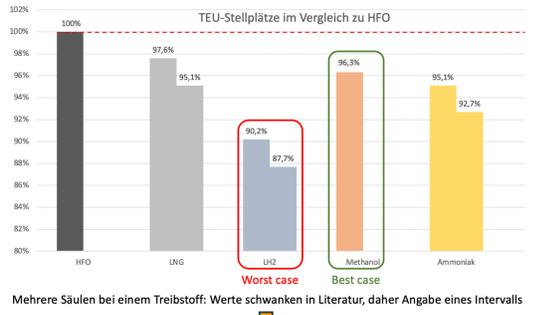
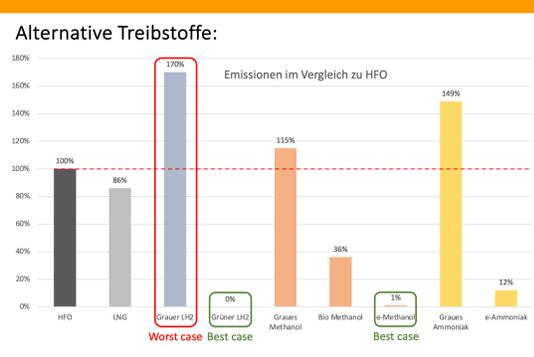


- Benötigte Zeit für die Route steigt überproportional stark zur Geschwindigkeitsverringern an.
- Der Energiebedarf, der Treibstoffverbrauch, die Treibstoffkosten und die Emissionen sinken hingegen überproportional zur jeweiligen Geschwindigkeitsverringern.
- Dennoch reicht Slow Steaming nicht aus, um Klimaneutralität zu erreichen.

Alternative Treibstoffe sind unausweichlich

**Synergieeffekte:**  
Werden Slow Steaming und alternative Treibstoffe gemeinsam genutzt können Synergieeffekte genutzt werden:

- Zusätzliche Kosten der neuen Treibstoffe können gesenkt werden
- Emissionen können zusätzlich verringert werden
- Tanks können u.U. kleiner gebaut werden



**Analyse Emissionen:**

- Grüner Wasserstoff ist theoretisch die ideale Lösung, aber aus ökonomischer Sicht nicht sinnvoll (siehe unten).
- E-Methanol als beste Lösung bezogen auf Ökonomie und Ökologie.
- E-Ammoniak ist ebenfalls eine gute Alternative.
- Graue Treibstoff-Varianten sollten gar nicht und LNG bzw. Bio-Methanol sollten nur als Übergangslösung genutzt werden.

**Analyse TEU-Stellplatzverlust:**  
Alle alternative Treibstoffe führen ceteris paribus zu einem potentiellen TEU-Stellplatzverlust, aufgrund von geringeren volumenbezogenen Energiedichten, besonderen Tankformen, oder spezieller Isolationsanforderungen.

- Methanol führt potentiell zu geringstem TEU-Stellplatzverlust
- Grüner Wasserstoff führt zu größtem TEU-Stellplatzverlust (siehe Bild) und ist daher aus ökonomischer Sicht keine sinnvolle Lösung für die internationale Containerschifffahrt.

**Abkürzungen:**

- HFO: Heavy Fuel Oil
- LH<sub>2</sub>: Flüssiger Wasserstoff
- LNG: Liquefied Natural Gas
- Kn: Knoten (Seemeilen/Stunde)
- TEU: Twenty-Foot Equivalent Unit

## Zusammenfassung und Ausblick

**Zusammenfassung:**  
Slow Steaming alleine kann Emissionen und Treibstoffkosten senken, aber verlängert gleichzeitig die Fahrtzeit/Lieferzeit und mit fossilen Brennstoffen ist keine Klimaneutralität möglich. Alternative Treibstoffe werden also benötigt.

Grüner Wasserstoff ist zwar ökologisch sehr gut, aber ist ökonomisch nicht sinnvoll für die internationale Containerschifffahrt, da die benötigte Größe der Tanks zu viele TEU-Stellplätze kostet. Insbesondere e-Methanol ist eine gute Alternative, um Ökonomie und Ökologie zu vereinen, aber auch e-Ammoniak ist vielversprechend. Mit beiden Treibstoffen ist zumindest eine annähernde Klimaneutralität möglich und der TEU-Stellplatzverlust fällt deutlich geringer aus, als bei Wasserstoff.

In Kombination können Slow Steaming und alternative Treibstoffe Synergieeffekte entwickeln und der internationalen Containerschifffahrt gemeinsam effektiv zur Klimaneutralität verhelfen.

**Ausblick:**

- Ausbau erneuerbarer Energien ist dringend erforderlich, um genügend e-fuels herstellen zu können.
- Ausbau der Versorgungsinfrastruktur ist ebenfalls erforderlich, um gesicherte Versorgung entlang der Routen zu gewährleisten, damit Tanks ggf. kleiner gebaut werden können und weniger Container-Stellplätze wegfallen.
- Forschung wird in Zukunft zahlreiche neue Erkenntnisse liefern.
- Technische Entwicklung schreitet schnell voran.
- Preisentwicklung der alternativen Treibstoffe wird mit entscheidend sein.