Beauftragt durch:

Bundesministerium für Digitales und Verkehr

Vergabe und Projektbegleitung durch:

NOW-GMBH.DE

Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich

# STUDIE ALTERNATIVE ANTRIEBE FÜR HAFENUMSCHLAGGERÄTE

## ABSCHLUSSBERICHT

RAMBOLL Bright ideas. Sustainable change.

# STUDIE ALTERNATIVE ANTRIEBE FÜR HAFENUMSCHLAGGERÄTE ABSCHLUSSBERICHT

| | |
|---|---|
| Projektname | **Studie Alternative Antriebe für Hafenumschlaggeräte** |
| Projekt Nr. | **352003404** |
| Auftraggeber | **Koordiniert durch NOW GmbH**<br>**Gefördert durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr** |
| Dokumententyp | **Abschlussbericht** |
| Datum | **13. Dezember 2022** |
| In Kooperation mit | **Prof. Dr. rer. nat. Johannes Gulden** |
| Bildnachweise | **Berichtsdeckblatt © Terberg Special Vehicles** |

Ramboll
Dierkower Damm 29
18146 Rostock

Phone: +49 381 252 952 0
E-Mail: rostock@ramboll.com
Web: https://de.ramboll.com

Ramboll Deutschland GmbH

Jürgen-Töpfer-Straße 48
22763 Hamburg
Germany

Amtsgericht Hamburg, HRB 168273
Geschäftsführer:
Stefan Wallmann, Hannes Reuter

BNP Paribas S.A. Niederlassung
Deutschland
IBAN: DE40512106004223034010
BIC: BNPADEFFXXX

# INHALTE


| | | |
|---|---|---|
| **1.** | **Einleitung** | **8** |
| 1.1 | Hintergrund und Zweck der Untersuchung | 8 |
| 1.2 | Vorgehensweise und Struktur | 9 |
| **2.** | **Bestandsanalyse für Hafenumschlaggeräte** | **10** |
| 2.1 | Analyse des Gerätebestandes im Status quo | 10 |
| 2.1.1 | Methodik und Herangehensweise | 10 |
| 2.1.2 | Datenbasis Umfragerückläufer und Desk Research | 12 |
| 2.1.3 | Gerätebestand im Status quo | 14 |
| 2.2 | Potenzialanalyse zur Bestandsentwicklung | 19 |
| 2.2.1 | Methodik | 19 |
| 2.2.2 | Umschlagentwicklung | 19 |
| 2.2.3 | Fortschreibung des Gerätebestandes | 21 |
| 2.3 | $CO_2$-Emissionen des Gerätebestandes | 23 |
| **3.** | **Analyse alternativer Technologien für Hafenumschlaggeräte** | **28** |
| 3.1 | Marktverfügbarkeit alternativer Technologien für Hafenumschlaggeräte | 33 |
| 3.2 | Untersuchung der Analysekriterien | 34 |
| 3.2.1 | Technologische Reife | 34 |
| 3.2.2 | Technische Parameter | 41 |
| 3.2.3 | Betriebszeit | 41 |
| 3.2.4 | Emissionen | 42 |
| 3.2.5 | Nachhaltigkeit | 43 |
| 3.2.6 | Gerätekosten | 45 |
| 3.2.7 | Automatisierungspotenzial | 45 |
| 3.2.8 | Benötigte Infrastruktur | 46 |
| 3.2.9 | Risiken Aufrechterhaltung Regelbetrieb | 46 |

| | | |
|---|---|---|
| 3.2.10 | Sonstige Einstiegshürden | 47 |
| 3.3 | Bewertung alternativer Technologien für Hafenumschlaggeräte | 48 |
| 3.3.1 | Auswertung der relevanten Gerätetyp-Antriebs-Kombinationen | 48 |
| 3.3.2 | Ableitung einer Gesamtbewertung für die Potenzialanalyse | 59 |
| **4.** | **Potenzialanalyse zur Substitution der Geräteflotte durch Equipment mit alternativen Antrieben** | **63** |
| 4.1 | Methodik | 63 |
| 4.2 | Substitutions-Szenarien & Emissionsreduktionspotenzial | 64 |
| 4.2.1 | Szenario A: Business as usual | 64 |
| 4.2.2 | Szenario B: Mit halber Kraft | 65 |
| 4.2.3 | Szenario C: Volle Kraft voraus | 69 |
| **5.** | **Zusammenfassung und Fazit** | **72** |

# ABBILDUNGEN


| | | |
|---|---|---|
| Abbildung 1 \| | Struktureller Aufbau der Studie | 9 |
| Abbildung 2 \| | Antriebsmix - Prozentuale Gesamtbetrachtung je Gerätetyp (Stand: 31.12.2021) | 17 |
| Abbildung 3 \| | Altersprofil des Gerätebestandes im Vergleich Seehäfen x Binnenhäfen (Stand: 31.12.2021) | 17 |
| Abbildung 4 \| | Angestrebte Wiederveräußerung der Umschlaggeräte | 18 |
| Abbildung 5 \| | Seehäfen Umschlagentwicklung der relevanten Ladungsarten | 20 |
| Abbildung 6 \| | Binnenhäfen Umschlagentwicklung der relevanten Ladungsarten | 21 |
| Abbildung 7 \| | Dieselverbrauch im Verhältnis zu Betriebsstunden je Gerätetyp | 24 |
| Abbildung 8 \| | $CO_2$-Emission im Verhältnis zu Dieselverbrauch | 25 |
| Abbildung 9 \| | Seehäfen: $CO_2$-Emission des Gerätebestandes im Status quo, 2030 und 2040 | 26 |
| Abbildung 10 \| | Binnenhäfen: $CO_2$-Emission des Gerätebestandes im Status quo, 2030 und 2040 | 27 |
| Abbildung 11 \| | System für die Bewertung der Analysekriterien | 30 |
| Abbildung 12 \| | Übersicht der untersuchten Gerätehersteller und ihrer Abdeckung der Umschlaggeräte | 32 |
| Abbildung 13 \| | Herstellermix (prozentuale Gesamtbetrachtung) in den See- und Binnenhäfen über alle Geräte | 32 |
| Abbildung 14 \| | Bedeutung der TRL zur Bewertung des Entwicklungsstands neuer Technologien [46] | 34 |
| Abbildung 15 \| | Factsheet vollelektrische AGVs | 49 |
| Abbildung 16 \| | Factsheet wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-AGVs | 50 |
| Abbildung 17 \| | Factsheet vollelektrische (Schwerlast-)Gabelstapler | 51 |
| Abbildung 18 \| | Factsheet wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-(Schwerlast-)Gabelstapler | 52 |
| Abbildung 19 \| | Factsheet vollelektrische Hafenmobilkrane | 53 |
| Abbildung 20 \| | Factsheet vollelektrische Leercontainerstapler | 54 |

Abbildung 21 | Factsheet vollelektrische Reachstacker 55

Abbildung 22 | Factsheet vollelektrische Straddle Carrier 56

Abbildung 23 | Factsheet vollelektrische Zugmaschinen 57

Abbildung 24 | Factsheet wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Zugmaschinen 58

Abbildung 25 | Gesamtbewertung der Gerätetyp-Antrieb-Kombinationen im Vergleich zum Diesel-Benchmark 59

Abbildung 26 | Veränderung der Gesamtbewertung der Gerätetyp-Antrieb-Kombinationen bei Herstellung einer Kostenparität 61

Abbildung 27 | Veränderung der Gesamtbewertung der Gerätetyp-Antrieb-Kombinationen bei bedeutend besserer Bewertung der Kostenbestandteile alternativer Antriebstechnologien 62

Abbildung 28 | Szenario A – $CO_2$-Emission auf Basis von Elektrifizierungs- und Automatisierungsvorhaben in deutschen Seehäfen 65

Abbildung 29 | Szenario B – *Mit halber Kraft* in deutschen Seehäfen 66

Abbildung 30 | Szenario B – *Mit halber Kraft* in deutschen Binnenhäfen 68

Abbildung 31 | Szenario C – *Mit voller Kraft* in deutschen Seehäfen 69

Abbildung 32 | Szenario C – *Mit voller Kraft* in deutschen Binnenhäfen 71

Abbildung 33 | Emissionsreduktionspotenzial in der Gesamtbetrachtung 73

Abbildung 34 | Trade-off bei der Eignung vollelektrischer Antriebe für Hafenumschlaggeräte 74

# TABELLEN


| | | |
|---|---|---|
| Tabelle 1 \| | Indikative Zuordnung von Gerätetypen, Merkmalen sowie Ladungsarten | 14 |
| Tabelle 2 \| | Seehäfen: Gerätebestand 2021 | 15 |
| Tabelle 3 \| | Binnenhäfen: Gerätebestand 2021 | 16 |
| Tabelle 4 \| | Seehäfen: Bestandsentwicklung der Umschlaggeräte 2030 und 2040 | 22 |
| Tabelle 5 \| | Binnenhäfen: Bestandsentwicklung der Umschlaggeräte 2030 und 2040 | 23 |
| Tabelle 6 \| | Analysekriterien für die Bewertung der alternativen Technologien | 29 |
| Tabelle 7 \| | Gewichtung der Analysekriterien nach Gerätetypen | 31 |
| Tabelle 8 \| | Herstellerangebot, Perspektiven und technologischer Reifegrad alternativ angetriebener AGVs | 35 |
| Tabelle 9 \| | Herstellerangebot, Perspektiven und technologischer Reifegrad alternativ angetriebener (Schwerlast-)Gabelstapler | 36 |
| Tabelle 10 \| | Herstellerangebot, Perspektiven und technologischer Reifegrad alternativ angetriebener Hafenmobilkrane | 37 |
| Tabelle 11 \| | Herstellerangebot, Perspektiven und technologischer Reifegrad alternativ angetriebener Leercontainerstapler | 37 |
| Tabelle 12 \| | Herstellerangebot, Perspektiven und technologischer Reifegrad alternativ angetriebener Reachstacker | 38 |
| Tabelle 13 \| | Herstellerangebot, Perspektiven und technologischer Reifegrad alternativ angetriebener Straddle Carrier | 39 |
| Tabelle 14 \| | Herstellerangebot, Perspektiven und technologischer Reifegrad alternativ angetriebener Zugmaschinen | 40 |
| Tabelle 15 \| | Bewertung von Emissionen alternativer Antriebstechnologien im Vergleich zum Dieselantrieb | 43 |
| Tabelle 16 \| | Nachhaltigkeitskriterien alternativer Technologien für Hafenumschlaggeräte | 44 |

Tabelle 17 | Szenario B – Gerätebestand nach teilweiser Substitution in den Seehäfen 67

Tabelle 18 | Szenario B – Gerätebestand nach teilweiser Substitution in den Binnenhäfen 68

Tabelle 19 | Szenario C – Gerätebestand nach vollständiger Substitution in den Seehäfen 70

Tabelle 20 | Szenario C – Gerätebestand nach vollständiger Substitution in den Binnenhäfen 71

# ABKÜRZUNGEN

| | |
|---|---|
| **AfA** | Absetzung für Abnutzung (AfA-Tabelle AV = Abschreibungstabelle für allgemein verwendbare Anlagegüter) |
| **AGV** | Automated Guided Vehicle |
| **ASC** | Automated Stacking Crane |
| **BÖB** | Bundesverband Öffentlicher Binnenhäfen e.V. |
| **HHLA** | Hamburger Hafen und Logistik AG |
| **LoLo** | Lift-on-Lift-off |
| **$NO_X$** | Stickoxide |
| **PM** | Particulate Matter (Feinstaub) |
| **RMG** | Rail-Mounted Gantry Crane |
| **RoRo** | Roll-on-Roll-off |
| **RTG** | Rubber-Tyred Gantry Crane |
| **$SO_X$** | Schwefeloxide |
| **TCO** | Total Costs of Ownership (Gesamtkosten des Betriebs) |
| **THG** | Treibhausgas |
| **TRL** | Technology Readiness Level |
| **ZDS** | Zentralverband der deutschen Seehafenbetriebe e. V. |

# 1. EINLEITUNG

## 1.1 Hintergrund und Zweck der Untersuchung

Der Güterumschlag zählt zu den energie- und emissionsintensivsten Aktivitäten innerhalb von See- und Binnenhäfen. Die für den Umschlag, inkl. Ein- und Auslageraktivitäten, unterschiedlicher Ladungs- und Güterarten entwickelten Geräte verursachen dabei einerseits direkte/*downstream* Emissionen (*tank-to-wheel*) als auch indirekte/*upstream* Emissionen (*well-to-tank*). Die spezifischen *lifecycle*-Treibhausgas- (THG-) und Schadstoffemissionen variieren dabei vor allem mit dem genutzten Kraftstoff bzw. Energieträger, seiner Gestehung sowie dem jeweiligen Antriebs- bzw. Motorkonzept.

Gegenwärtig nutzt die Mehrheit der mobilen Geräte im Hafenumschlag Dieselkraftstoff (zumeist steuerbegünstigter „Hafendiesel"). Während ortsfeste Umschlaggeräte, wie z. B. Containerbrücken oder *Rail-Mounted Gantry Cranes* (RMG), bereits überwiegend mit Netzstrom betrieben werden, bildet die direkte Nutzung von Strom als Energiequelle bei mobilen Geräten, wie z. B. mit Akkumulatoren in *Automated Guided Vehicles* (AGV), bisher eher noch die Ausnahme. Weitere alternative Antriebstechnologien, wie z. B. die Wasserstoff-Brennstoffzelle, werden derzeit u. a. in Terminal-Zugmaschinen pilotiert.

Wie auch andere Wirtschaftsbereiche strebt die Hafenwirtschaft eine Defossilisierung seiner Prozesse an.

Ziel der Studie ist zum einen die Abschätzung des Bestandes der Hafenumschlaggeräte in deutschen See und Binnenhäfen sowie die Emissionen im Status quo. Darüber hinaus soll herausgestellt werden, welche Antriebstechnologien für den emissionsfreien Betrieb von Umschlaggeräten (perspektivisch) zur Verfügung stehen und welche Voraussetzungen bzw. Vor- und Nachteile die alternativen Kraftstoff- und Antriebsportfolios mit sich bringen. Die am besten geeigneten Technologien sollen dabei herausgestellt und das Potenzial für Hafenumschlageräte mit alternativen Antrieben abgeschätzt werden.

## 1.2 Vorgehensweise und Struktur

Der vorliegende Bericht gliedert sich in fünf Kapitel. Die einzelnen inhaltlichen Abschnitte bauen teilweise aufeinander auf bzw. bedingen einander. Die Abbildung 1 verdeutlicht den strukturellen Aufbau und die einzelnen Zusammenhänge der Studie.

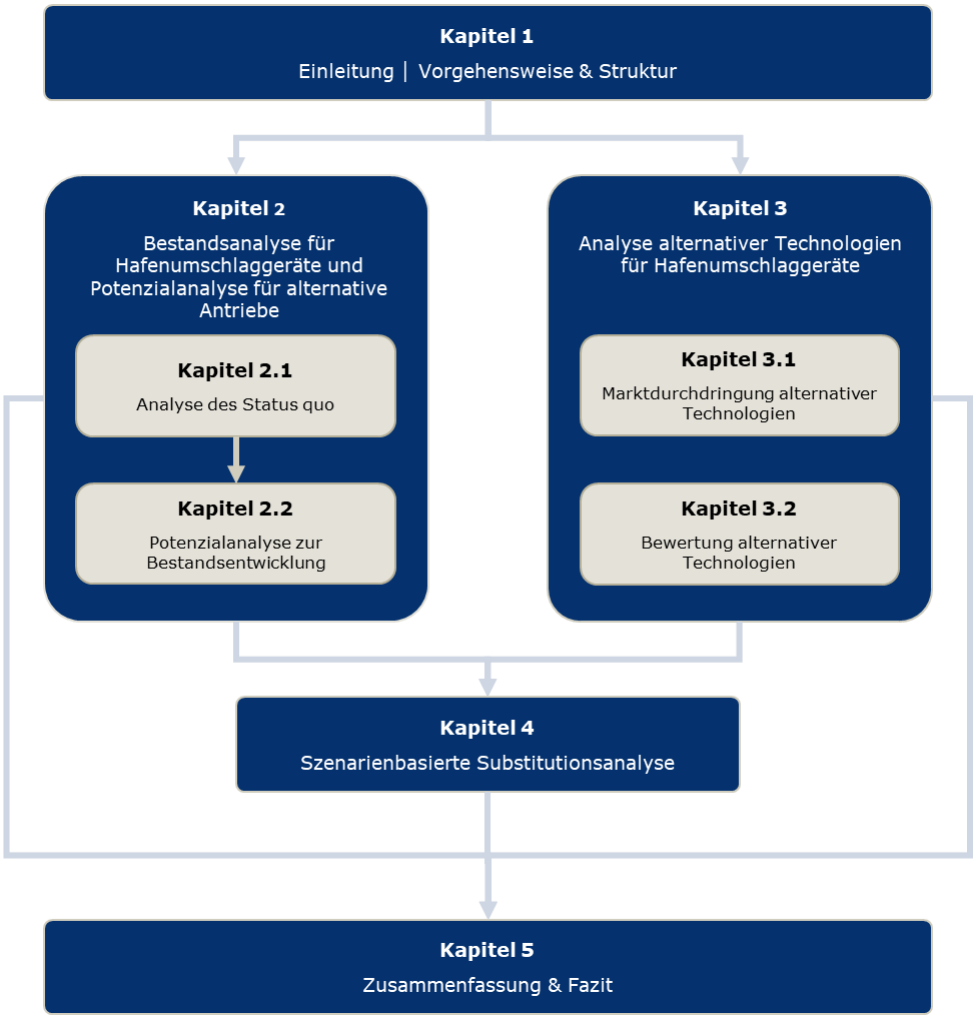



**Abbildung 1 | Struktureller Aufbau der Studie**

Kapitel 1 widmet sich, neben der generellen Beschreibung des Hintergrunds und des Zwecks der Studie, der Erläuterung der strukturellen Zusammenhänge der einzelnen inhaltlichen Abschnitte.

Das Kapitel 2 und folgende widmen sich den eigentlichen inhaltlichen Analysen dieser Studie.

Kapitel 2 thematisiert dabei die Bestandsanalyse für Hafenumschlaggeräte. Zunächst wird der Status quo des Gerätebestandes in deutschen See- und Binnenhäfen in dem Unterkapitel 2.1 abgebildet, um schließlich unter Berücksichtigung der Umschlagentwicklung das Potenzial der zukünftigen Bestandsentwicklung bis 2040 in Kapitel 2.2 abzubilden. Der vorläufige inhaltliche Abschluss wird in Kapitel 1.3 durch eine $CO_2$-Emissionsberechnung des Gerätebestandes im Status quo und in Hinblick auf die Gerätebestandsentwicklung abgebildet.

Das Kapitel 3 thematisiert die Analyse alternativer Technologien für Hafenumschlaggeräte und die geeignetsten Alternativen mithilfe eines umfassenden Bewertungssystems unter Berücksichtigung

diverser Faktoren wie u. a. der technologischen Reife, Betriebszeit sowie Gerätekosten herausstellt.

Das Kapitel 4 beinhaltet die Analyse zur Substitution der Geräteflotte durch alternative Antriebskonzepte bis 2040. Die Bearbeitung erfolgt auf Basis der Ergebnisse aus Kapitel 3. In diesem Zusammenhang werden drei Szenarien zum Substitutionspotenzial abgebildet, um ferner das Emissionsreduktionspotenzial auszuweisen.

Neben der Ergebnisdarstellung der Studie in Berichtsform, werden die Ergebnisse in leserfreundlicher Art in Form von Factsheets für die geeigneten alternativen Kraftstoff- und Antriebsportfolios für ausgewählte Gerätetypen dargestellt.

Aufgrund der Komplexität der einzelnen Methodiken, die in den verschiedenen (Teil-)abschnitten Anwendung findet, erfolgt die ausführliche Erläuterung individuell für den jeweiligen Abschnitt.

# 2. BESTANDSANALYSE FÜR HAFENUMSCHLAGGERÄTE

Die Bestandanalyse für Hafenumschlaggeräte ist in drei wesentliche Bereiche unterteilt. Das Kapitel beinhaltet zum einen die Bestandsanalyse des Status quo als auch der Ableitung des Gerätebestandes bis zum Jahr 2040. In einem letzten Analyseschritt erfolgt die Potenzialabschätzung zur Substitution der Gerätetypen durch alternative Antriebskonzepte. Die einzelnen Methodikschritte bauen aufeinander auf und werden für jeden Unterabschnitt jeweils detailliert ausgeführt.

Keinen umfangreichen Eingang in die Bestandsanalyse haben Nutzfahrzeuge der Klassen N1 bis N3 sowie Pkw gefunden. Eine eingehende Recherche der Angaben führender Umschlagbetriebe zeigte, dass diese Fahrzeuge i. d. R. nicht unmittelbar mit der Leistungserstellung (Umschlag) der Betriebe im Hafen verbunden sind und mitunter auch außerbetrieblich eingesetzt werden. Somit fallen die betreffenden Fahrzeuge zum einen unter bereits existierende Förderrichtlinien für Straßenfahrzeuge, zum anderen belegen die wenigen öffentlichen Angaben zur Anzahl, wie gering der Anteil gemessen am Bestand der Hafenumschlaggeräte ausfällt. So gibt bspw. die Berliner Hafen und Lagerhausgesellschaft mbH an, insgesamt drei Lkw der Klasse N3 im Fuhrpark zu führen und diese auf einen Antrieb mit komprimiertem Erdgas umgestellt zu haben **[48]**. Im Pkw-Bereich ist dagegen bereits eine weit vorangeschrittene Elektrifizierung wahrzunehmen, die Hamburger Hafen und Logistik AG (HHLA) listet in ihrem aktuellen Geschäftsbericht insgesamt 96 vollelektrische Pkw **[49]**.

Neben den nachfolgend fokussierten Gerätetypen sind kleinere mobile Stapler (Tragfähigkeit < 6 t) sowie semi-mobile Portal- und Ship-to-Shore-Krane als sonstige Hafenumschlaggeräte zu nennen. Der Anteil letzterer semi-mobiler Einheiten am in der Umfrage erhobenen Pool von Hafenumschlaggeräten in See- und Binnenhäfen lag bei 17 %. Da der Elektrifizierungsgrad unter den erhobenen Geräten bei nahezu 100 % lag und somit im Vergleich zu anderen Typen bereits sehr hoch ist, ist das Emissionsreduktionspotenzial im Allgemeinen als gering anzusehen.

## 2.1 Analyse des Gerätebestandes im Status quo

### 2.1.1 Methodik und Herangehensweise

In einem ersten Schritt wird eine webbasierte Umfrage unter den Umschlagbetrieben in Deutschen See- und Binnenhäfen durchgeführt. Die Umfrage zielt darauf ab ein umfassendes Bild

des derzeitigen Gerätebestandes abzubilden und bildet die Basis für die übergreifende Bestandsanalyse in diesem Kapitel.

Die Bestandsanalyse zielt im Wesentlichen auf die folgenden Gerätetypen ab, welche teilweise zusätzlich nach Leistungsmerkmalen unterschieden werden:

- Van / Straddle Carrier
- Reachstacker
- Leercontainerstapler
- Stapler (Tragfähigkeit: 6-12 t)
- Stapler (Tragfähigkeit: > 12 t)
- Terminalzugmaschine (Antriebsformel: 4x2)
- Terminalzugmaschine (Antriebsformel: 4x4)
- Hafenmobilkran (Motorleistung: ≤250 kW)
- Hafenmobilkran (Motorleistung: 251-450 kW)
- Hafenmobilkran (Motorleistung: 451-650 kW)
- Hafenmobilkran (Motorleistung: > 650 kW)

Neben der Abfrage des Gerätebestandes (Stand 31.12.2021), werden diverse Angaben u. a. zum durchschnittlichen Fahrzeugalter sowie Angaben zu Betriebsstunden, Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch sowie $CO_2$-Ausstoß erhoben. Diese Angaben werden u. a. zur Plausibilisierung der Bewertungsfaktoren in Kapitel 3 heranzogen. Darüber hinaus wird der Herstellermix je Gerätetyp sowie bestehende Präferenzen bei Neuanschaffungen hinsichtlich des Antriebskonzeptes abgefragt.

Für eine tiefergehende Qualifizierung des Gerätebestandes insbesondere mit Hinblick auf die zukünftige Entwicklung werden zudem Daten zu den folgenden Geräten erhoben:

- Automated Guided Vehicle (AGV)
- Gummibereifter Portalkran (RTG)
- Schienengeführter Portalkran (RMG)
- Schiffsbelader (Bspw.: Ship-to-Shore-Crane).

Der Fragebogen wurde über die Befragungssoftware SurveyXact by Ramboll erstellt und in einem ersten Schritt über den Postweg inkl. eines Begleitschreibens des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) an die Adressaten geschickt. Der ausgefüllte Fragebogen konnte somit in Papierform sowie als Scan / Telefax oder über die Software übermittelt werden.

Für eine weitergehende Verbreitung der Umfrage wurden zudem diverse Branchen-Verbände und -Vereine als Multiplikatoren mobilisiert, die ihre Netzwerke zusätzlich zur Teilnahme an der Umfrage ermutigt haben. Darunter zählen u. a.

- Zentralverband der deutschen Seehafenbetriebe e. V. (ZDS)
- Bundesverband Öffentlicher Binnenhäfen e. V. (BÖB)
- Unternehmensverband Hafen Hamburg e. V.
- ShortSeaShipping Inland Waterway Promotion Center (spc)
- Seaports Niedersachsen.

Mithilfe einer Desk Research von z. B. Internetpräsenzen wurden fehlende typenspezifische Fahrzeugbestandsdaten der Hafenumschlagbetriebe erhoben. Sofern weitere relevante

Kennzahlen publiziert sind, wurden auch diese verwertet. Zudem verfügt Ramboll über interne Datensätze, welche für eine zusätzliche Qualifizierung der Zahlen gezielt eingesetzt wurde.

Die Analyse des Bestandes der ausgewählten Hafenumschlaggeräte im Status quo basiert im Wesentlichen auf den Umfrageergebnissen und der zusätzlichen Desk Research. Für Standorte mit fehlenden Angaben wurde der Gerätebestand je Typ unter Berücksichtigung des Umschlagportfolios (Ladungs- und Güterarten) und von indikativen Umschlagmengen abgeschätzt. Dieser Arbeitsschritt erfolgt durch eine gezielte Verknüpfung der ladungsträgerspezifischen Umschlagmengen sowie Gerätetypen für das Betrachtungsjahr 2021. Hierdurch gelingt eine „Kalibrierung" der bisherigen Produktivität an den Hafenstandorten. Die erzeugten Produktivitätskennzahlen dienen in diesem Zusammenhang als Ausgangspunkt für die Hochrechnung des Gerätebestands zum 31.12.2021.

Ziel dieses Unterkapitels ist schlussendlich die Ableitung des Gerätebestandes je Gerätetyp im Status quo sowie das Herausstellen der derzeitigen Marktdurchdringung alternativer Antriebe (Antriebsmix) im Bereich des Hafenumschlagequipments.

### 2.1.2 Datenbasis Umfragerückläufer und Desk Research

Insgesamt wurden 360 Umschlagbetriebe in deutschen See- und Binnenhäfen über direkten Weg per Briefpost und / oder E-Mail kontaktiert. In den Binnenhäfen wurden somit 173 Unternehmen kontaktiert, während in den Seehäfen 187 Umschlagbetriebe den Fragebogen erreichten. Die zuvor aufgeführten Branchen-Verbände- und Vereine haben deren Netzwerke zusätzlich zur Teilnahme an der Umfrage ermutigt.

Die Umfragedaten wurden über einen Zeitraum von sechs Wochen erfasst und ausgewertet. Einzelne verspätete Rückläufer wurden nachträglich in die Auswertung aufgenommen und finden in der Studie Berücksichtigung.

<u>Rücklaufquote (Adressaten)</u>

Insgesamt haben 58 Umschlagunternehmen an der Umfrage teilgenommen. Dabei wurden aus den Seehäfen 22 vollständig und acht unvollständig ausgefüllte Fragebögen eingereicht. Aus den deutschen Binnenhäfen nahmen 21 Umschlagbetriebe vollständig und sieben Betriebe unvollständig an der Umfrage teil.

Gemessen an den Umschlagbetrieben wird somit eine Rücklaufquote von 16 % sowohl in den Binnenhäfen als auch in den Seehäfen erreicht.

Die Rücklaufquote in Bezug auf die Anzahl der Umschlagbetriebe ist in Hinblick auf die Intention der Umfrage nicht aussagekräftig. Insbesondere die Umschlagemenge, die durch die teilnehmenden Umschlagbetriebe abgedeckt wurde, ist von Bedeutung, um zunächst den Status quo des Gerätebestandes zu ermitteln.

<u>Rücklaufquote (Umschlagmenge)</u>

Für die deutschen Seehäfen wird insgesamt eine Rücklaufquote von 61 % in Bezug auf die relevante Umschlagmenge erreicht. Durch eine zusätzliche gezielte Deskresearch werden schließlich insgesamt fast 90 % der Umschlagmenge abgedeckt. Für die Ladungsbereiche Container und RoRo wird dabei nahezu Vollerhebungen erzielt - lediglich im Bereich der Schüttgüter und sonstige Ladung beträgt der Umfang der Datenverfügbarkeit weniger als 50 %.

Im Bereich der deutschen Binnenhäfen wird dagegen eine Rücklaufquote von 21 % erreicht, welche durch eine Deskresearch auf eine Datenverfügbarkeit von 26 % der Umschlagmenge erweitert wird. Die vergleichsweise geringe Rücklaufquote ist im Wesentlichen auf die limitierte Informationslage im Bereich der Schüttgüter zurückzuführen. Im Rahmen der hier betrachteten Umschlageräte sind die ausgewählten Flurförderzeuge für Schüttgut jedoch nicht von großer Relevanz. Vielmehr sind die Hafenmobilkrane hier von Bedeutung. Für dieses Segment verfügt Ramboll über interne Datenbanken, die für eine Plausibilisierung und Qualifizierung der Ergebnisse hinzugezogen wird. Ohne Berücksichtigung der Schüttgüter wird eine Datenerhebung von mehr als 60 % der relevanten Umschlagmenge in den Binnenhäfen erzielt.

### 2.1.3 Gerätebestand im Status quo

Die Auswertung der Umfragerückläufer sowie die gezielte Desk Research haben ergeben, dass insbesondere in den Segmenten Container und RoRo eine umfassende Datenverfügbarkeit zum Status quo des Gerätebestandes vorhanden ist. Für die fehlenden Angaben vor allem in den Segmenten der Schüttgüter und sonstigen Ladung erfolgt eine Hochrechnung des Gerätebestandes auf die Umschlagmenge des Jahres 2021.

Die Tabelle 1 verdeutlicht zunächst die indikative Zuordnung der Gerätetypen zu den Ladungsarten – welche als Basis zur Ableitung des Gerätebestandes sowohl im Status quo als ferner zur Fortschreibung bis zum Jahr 2040 (siehe Kapitel 2.2) hinzugezogen wird.

| Gerät | | LoLo-Umschlag | | | RoRo-Umschlag |
|---|---|---|---|---|---|
| Typ | (Leistungs-) Merkmal | Schüttgüter (DBK) | Großcontainer/-behälter (LNCT) | Sonstige Ladung (OTH) | Mobile nicht selbst-fahrende Einheiten (RO_MNSP) |
| Van/Straddle Carrier | | | ✓ | | |
| Reachstacker | | | ✓ | | |
| Leercontainerstapler | | | ✓ | | |
| Stapler | 6 – 12 t | | | ✓ | **(✓)** |
| | > 12 t | | | ✓ | **(✓)** |
| Terminal-Zugmaschine | 4x2 | | **(✓)** | **(✓)** | ✓ |
| | 4x4 | | **(✓)** | **(✓)** | ✓ |
| Hafenmobilkran | <250 kW | ✓ | ✓ | ✓ | |
| | 251-450 kW | ✓ | ✓ | ✓ | |
| | 451-650 kW | ✓ | ✓ | ✓ | |
| | > 650 kW | ✓ | ✓ | ✓ | |

**Tabelle 1 | Indikative Zuordnung von Gerätetypen, Merkmalen sowie Ladungsarten**

Die Verknüpfung dieser Parameter ermöglicht die Ermittlung einer durchschnittlichen Produktivität je Gerätetyp für die See- und Binnenhäfen. Diese Produktivität spiegelt die eingesetzte Gerätemenge je umgeschlagener Tonne wider. Für die nicht abgedeckte Umschlagmenge erfolgt darauf basierend eine Hochrechnung zum 31.12.2021.

Seehäfen

In den deutschen Seehäfen wird der Güterumschlag in der Gesamtbetrachtung insbesondere durch den Containerumschlag dominiert (gemessen an der Umschlagmenge). Die damit in direkter Verbindung stehenden Geräte wie Van / Straddle Carrier, AGV, Reachstacker, Leercontainerstapler weisen mehr als 40 % der gesamten Geräteflotte aus. Die eingesetzten Stapler und Zugmaschinen sind im Wesentlichen dem Handling von sonstiger Ladung und dem RoRo-Bereich zuzuordnen. Der Umschlagmenge entsprechend, wird auch in diesem Bereich eine hoher Gerätebestand ausgewiesen.

Der detaillierte Bestand der Umschlaggeräte nach Leistungsmerkmal in den deutschen Seehäfen zum 31.12.2021 ist der Tabelle 2 zu entnehmen.

| Gerätetyp | Leistungsmerkmal | Geräteanzahl (Stand: 31.12.2021) |
|---|---|---|
| Van / Straddle Carrier | | 588 |
| Automated Guided Vehicles (AGV) | | 91 |
| Reachstacker | | 81 |
| Leercontainerstapler | | 31 |
| Stapler | 6 – 12 t | 531 |
| | > 12 t | 114 |
| Terminal-Zugmaschine | 4x2 | 61 |
| | 4x4 | 277 |
| Hafenmobilkran | <250 kW | 13 |
| | 251-450 kW | 18 |
| | 451-650 kW | 7 |
| | > 650 kW | 33 |

**Tabelle 2 | Seehäfen: Gerätebestand 2021**

Binnenhäfen

In den deutschen Binnenhäfen erfolgt die Bewirtschaftung in Containerterminals nicht durch Straddle Carrier oder AGV, weshalb hier keine dieser Geräte im Status quo ausgewiesen werden. Viel mehr werden Reachstacker und Leercontainerstapler sowie Zugmaschinen teilweise in Kombination mit Portalkranen eingesetzt. Die Stapler werden im Wesentlichen für das Handling von Sonstiger Ladung eingesetzt. Schüttgutterminals weisen i. d. R. einen hohen Grad der Automatisierung auf – hier werden beispielsweise Förderband- und Verladeanlagen eingesetzt, weshalb der Anteil der hier betrachteten Geräte in Bezug auf Schüttgut als gering zu bewerten ist. Trotz der vergleichsweise geringen Datenverfügbarkeit im Schüttgut-Segment, ist die Hochrechnung somit als durchaus belastbar zu bewerten.

Der detaillierte Bestand der Umschlaggeräte nach Leistungsmerkmal in den deutschen Binnenhäfen zum 31.12.2021 ist der Tabelle 3 zu entnehmen.

| Gerätetyp | Leistungsmerkmal | Geräteanzahl (Stand: 31.12.2021) |
|---|---|---|
| Van / Straddle Carrier | | 0 |
| Automated Guided Vehicles (AGV) | | 0 |
| Reachstacker | | 77 |
| Leercontainerstapler | | 31 |
| Stapler | 6 – 12 t | 17 |
| | > 12 t | 37 |
| Terminal-Zugmaschine | 4x2 | 13 |
| | 4x4 | 6 |
| Hafenmobilkran | <250 kW | 27 |
| | 251-450 kW | 9 |
| | 451-650 kW | 6 |
| | > 650 kW | 6 |

**Tabelle 3 | Binnenhäfen: Gerätebestand 2021**

Antriebsmix

Der derzeitige Antriebsmix wurde im Wesentlichen auf Basis der Datenerhebung aus der Umfrage sowie einer zusätzlichen Qualifizierung der Ergebnisse aus Ramboll-internen Datensätzen ermittelt. Demnach werden zum 31. 12. 2021 etwa 7 % aller im Rahmen der Studie betrachteten Umschlaggeräte durch alternative Antriebe betrieben. Im Vergleich dazu wurden zum 01.01.2022 5 % der zugelassenen Fahrzeuge im Straßenverkehr durch alternative Technologien angetrieben **[04]**.

Die Datenerhebung hat folgende Antriebstechnologien aufgeführt:

- Diesel
- Diesel-elektrisch
- Diesel-hydraulisch
- Elektrisch
- Hybrid
- Wasserstoff
- Andere Antriebsarten

Die Abbildung 2 verdeutlicht, dass der genannte Anteil insbesondere auf den prozentualen Anteil der elektrifizierten AGV zurückzuführen ist. Dieser ist wiederum auf die deutschen Seehäfen zu beziehen und beträgt zum 31.12.2021 etwa 85 %. Während in den Seehäfen auf Basis der Umfrageergebnisse etwa 6 % der Stapler elektrobetrieben sind, beträgt der Anteil in den Binnenhäfen durchschnittlich 20 %. Insgesamt werden etwa 10 % der Hafenmobilkrane zum 31.12.2021 durch Strom betrieben. Ein sehr geringer Anteil der Van / Straddle Carrier ist Hybrid-betrieben. Die Antriebe Diesel, Diesel-elektrisch und Diesel-hydraulisch sind in der Abbildung unter „Diesel" zusammengefasst.

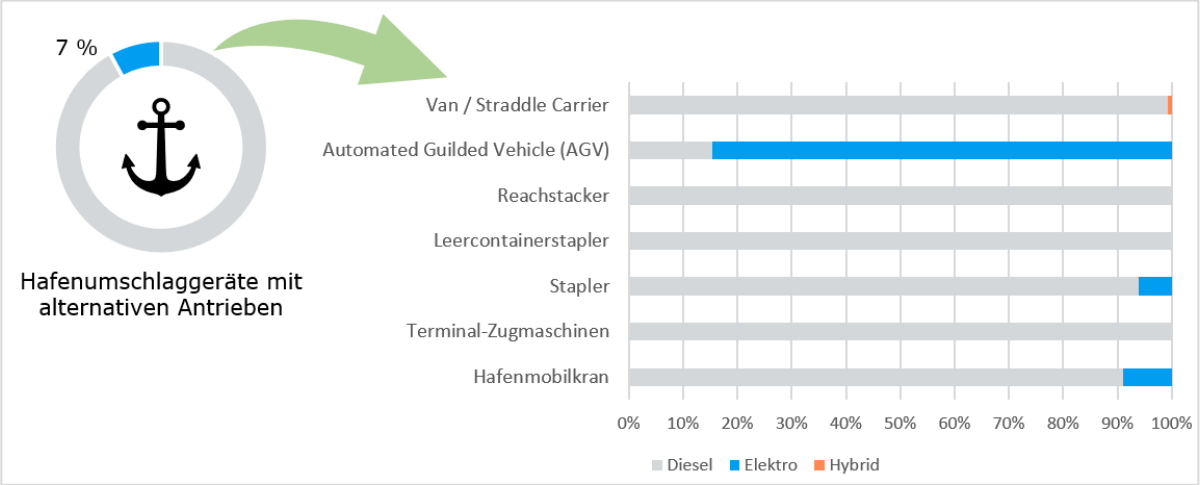



**Abbildung 2 | Antriebsmix - Prozentuale Gesamtbetrachtung je Gerätetyp (Stand: 31.12.2021)**

Altersprofil des Gerätebestandes im Status quo

Das Altersprofil des Gerätebestandes ist dahingehend von Bedeutung, da ein rollierendes Austauschsystem in Bezug auf die jeweilige Nutzungsdauer der Gerätetypen angenommen wird. Diese Ergebnisse werden insbesondere für die Analyse des Substitutionspotenzials hinzugezogen.

Die Abbildung 3 verdeutlicht das Altersprofil der Geräte unterteilt nach Flurförderzeuge und Hafenmobilkrane jeweils im direkten Vergleich zwischen See- und Binnenhäfen. Die Datenerfassung erfolgt in 4-Jahres-Ranges und gliedert sich in sechs Alterskategorien.

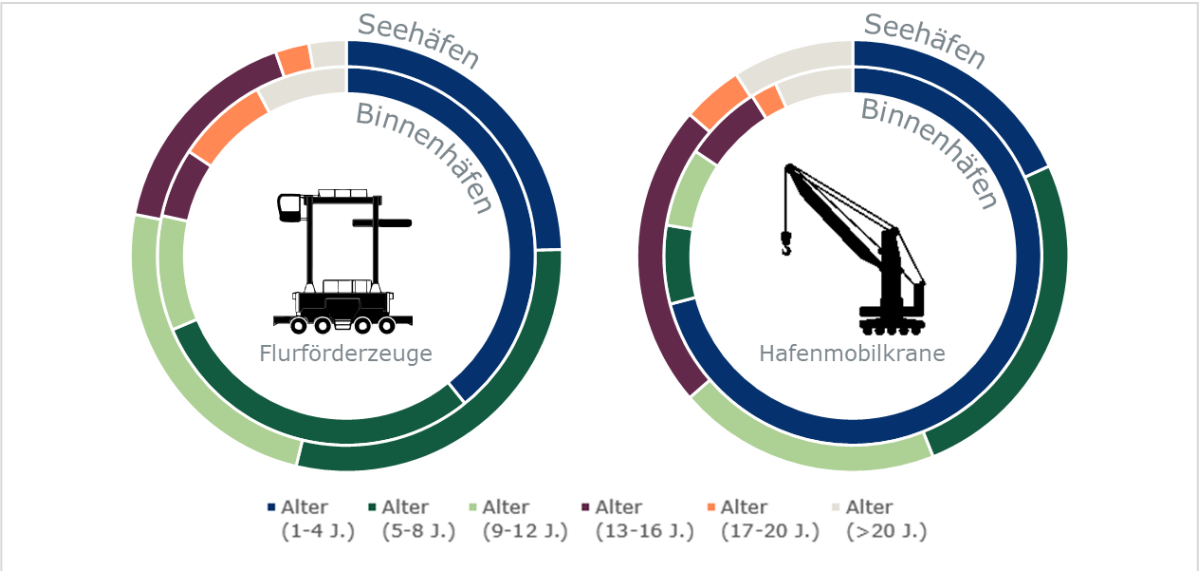



**Abbildung 3 | Altersprofil des Gerätebestandes im Vergleich Seehäfen x Binnenhäfen (Stand: 31.12.2021)**

Auf Basis der Umfrageergebnisse hat sich herausgestellt, dass die Flurförderzeuge (hier: Van Carrier, Reachstacker, Leercontainerstapler, Stapler, Terminal-Zugmaschinen) in den See- und Binnenhäfen durchschnittlich ein Median-Alter von 5-8 Jahren aufweisen und somit teilweise über der durchschnittlichen Nutzungsdauer in Betrieb sind. Ein Austausch einiger Geräte ist demnach anzunehmen.

Die Van / Straddle Carrier sind lediglich in den Seehäfen verbreitet und weisen auf Basis der Umfrageergebnisse beispielsweise ein Median-Alter von 9-12 Jahren auf, während als durchschnittliche Nutzungsdauer von den Umschlagbetrieben etwa 8-12 Jahre angegeben wurden. Demnach befinden sich die Geräte am Ende ihrer Servicezeit und ein Austausch ist zeitnah zu erwarten.

Das Median-Alter der Hafenmobilkrane ist im Durchschnitt mit 1-4 Jahren jünger als in den Seehäfen (5-9 Jahre). Tendenziell weisen ältere Geräte auf eine geringere Leistungsfähigkeit hin. Laut Umschlagbetrieben beträgt die durchschnittliche Nutzungsdauer zwischen 10-20 Jahren.

Wiederveräußerung der Umschlaggeräte

Die Angaben aus den Fragebögen verdeutlichen, dass grundsätzlich eine Wiederveräußerung nach der üblichen Nutzungsdauer der jeweiligen Gerätetypen angestrebt wird. Es wird angemerkt, dass häufig kein Zweitmarkt für beispielsweise Hafenmobilkrane besteht bzw. dieser tendenziell sehr klein ist, dennoch i. d. R. der Versuch einer Wiederveräußerung unternommen wird.

Zwar ist in diesem Zusammenhang zu berücksichtigen, dass keine vollumfängliche Beantwortung in der Umfrage verzeichnet wird, jedoch wird deutlich, dass langfristig die Notwendigkeit einer jeweiligen Kraftstoffverfügbarkeit auch auf dem Zweitmarkt erforderlich sein wird.

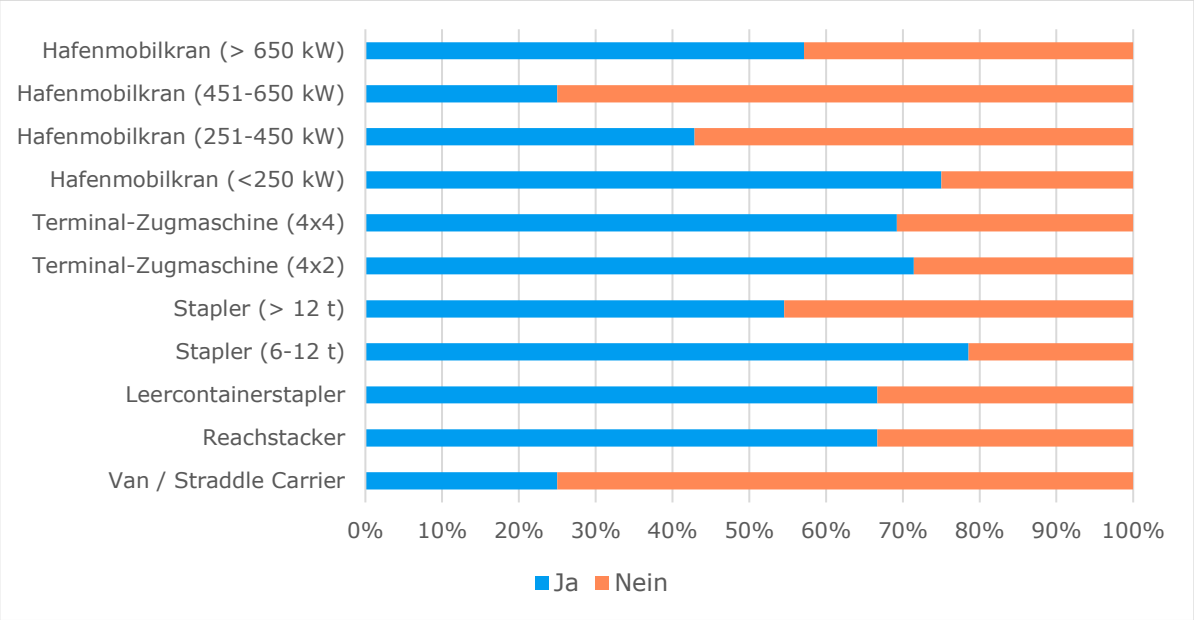



**Abbildung 4 | Angestrebte Wiederveräußerung der Umschlaggeräte**

## 2.2 Potenzialanalyse zur Bestandsentwicklung

### 2.2.1 Methodik

Das Unterkapitel 2.2 zielt auf die Analyse der Potenziale zur Entwicklung des Gerätebestandes bis 2030 und 2040 ab. In diesem Zusammenhang wird der zuvor ermittelte Status quo mit dem gegebenen Kraftstoff- und Antriebstechnologiemixes als gedanklicher Ausgangspunkt der Betrachtung aufgegriffen.

Grundsätzlich dient die Entwicklung des Güterumschlags als Basis der Fortschreibung des Gerätebestandes. Hierzu werden in einem ersten Schritt die Vorjahresstatistiken der Umschlagmengen der relevanten Ladungsarten entnommen und ausgewertet **[02] [03] [05] [06]**. Auf Grundlage einer Qualifizierung der aktuell noch gültigen Verkehrsprognose 2030 wird ein allgemein plausibler Entwicklungskorridor für die einzelnen Ladungsarten abgeleitet und in das Jahr 2040 projiziert. Eine individuelle Trendfortschreibung der einzelnen Ladungsarten ist hierbei elementar, um die mit ihnen direkt in Zusammenhang stehenden Auswirkungen berücksichtigen zu können. Zudem erfolgt auch hier eine separate Betrachtung der See- und Binnenhäfen.

Der zweite Arbeitsschritt dient der gezielten Verknüpfung der den statistischen Quellen entnommenen standort- und ladungsträgerspezifischen Umschlagmengen sowie Gerätetypen für das Betrachtungsjahr 2021. Die Produktivität würde bereits für die Hochrechnung des Gerätebestands im Status quo hinzugezogen und ist aus der Tabelle 1 bekannt.

Schließlich dienen die Produktivitätskennzahlen als Ausgangspunkt für die im letzten Analyseschritt durchzuführende Potenzialabschätzung zur Gerätebestandsentwicklung.

### 2.2.2 Umschlagentwicklung

Als Basis der Fortschreibung des Gerätebestandes für die Jahre 2030 und 2040 wird die erwartete Umschlagentwicklung hinzugezogen. Diese erfolgt jeweils für die See- und Binnenhäfen, wobei eine individuelle Fortschreibung der relevanten Ladungsarten Schüttgut, RoRo (mobile nicht selbst-fahrende Einheiten), sonstige Ladung und Container vorgenommen wurde.

In den deutschen Seehäfen sind die Großcontainer/-behälter das dominierende Ladungssegment in Bezug auf die Umschlagmenge der im Rahmen dieser Studie betrachteten Ladungsarten. Mit einem Anteil von mehr als 55 % ist der Kurvenverlauf des Gesamtumschlags entsprechend stark durch dieses Segment geprägt.

Insbesondere im Containersegment kam es in den vergangenen Jahren zu teilweise signifikanten Marktanteilsverschiebungen zwischen den im Wettbewerb stehenden Nordrange-Häfen (Hamburg-Le Havre-Range). Insgesamt verzeichnet die Nordrange von 2007 bis 2019 ein durchschnittliches jährliches Wachstum der Menge im Containerumschlag. Die deutschen Seehäfen zeigen zunächst einen Umschlagrückgang im Zuge der Wirtschafts- und Finanzkrise im Jahr 2008/2009, welcher sich bis zum Jahr 2011 auf das Vorkrisenniveau erholt. Bis zum Jahr 2014 wird ein jährliches Wachstum verzeichnet, die Umschlagmenge zwischen 2015 bis 2019 bleibt dagegen auf einem durchschnittlich konstanten Niveau, während die Umschlagmenge in der Nordrange jedoch zunimmt. Der Trendfortschreibung folgend, wird ein leichtes Wachstum des Containersegmentes in den deutschen Seehäfen erwartet.

Das Umschlagpotenzial der weiteren Ladungsarten wird insbesondere durch globale und nationale Trends beeinflusst. Entsprechend dynamisch können sich Veränderungen einstellen, wie sie aktuell z. B. durch nachhaltiges Wirtschaften insgesamt, die Dekarbonisierung der Wirtschaft mit

der Stilllegung von Kohlekraftwerken oder aber den Einfluss von Infrastrukturausbaumaßnahmen ausgelöst werden. Demzufolge ist insbesondere im Schüttgut-Segment (Kohle) ein negativer Wachstumstrend zu erwarten.

Die Abbildung 5 zeigt die reale Umschlagentwicklung der Jahre 2007 bis 2021 in deutschen Seehäfen sowie die erwartete Umschlagmenge bis 2040. Im Jahr 2021 wurden in den Seehäfen etwa 215 Mio. Tonnen der relevanten Ladungsarten umgeschlagen. Der Trendfortschreibung der jeweiligen Ladungsart folgend, wird bis zum Jahr 2040 ein Gesamtumschlag von etwa 230 Mio. Tonnen erwartet.

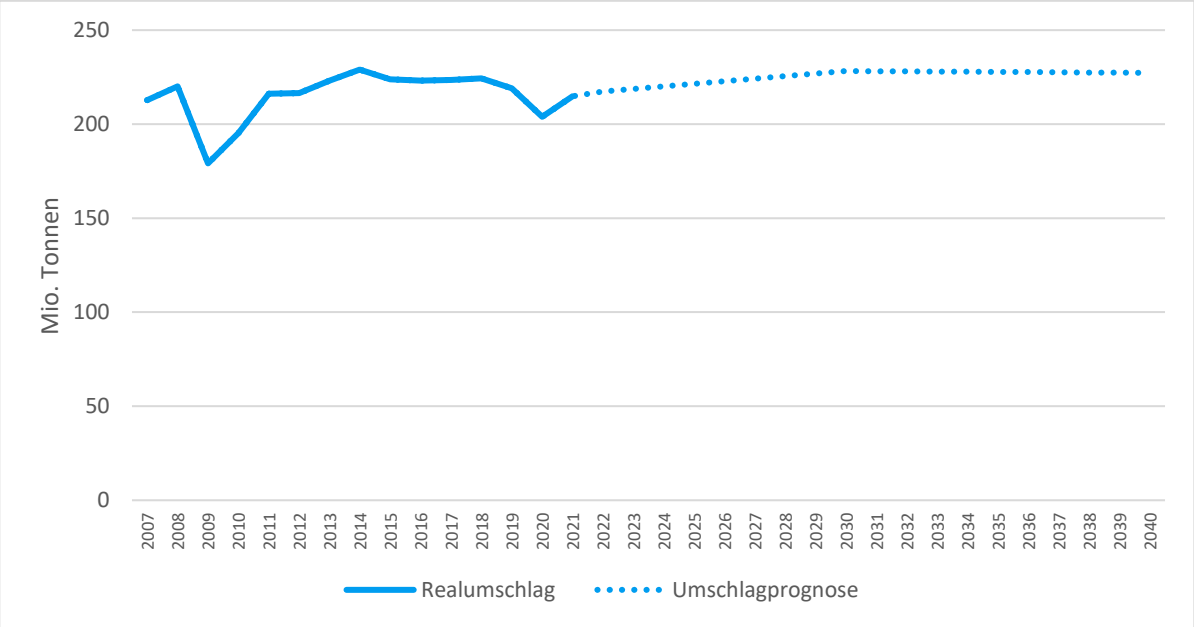



**Abbildung 5 | Seehäfen Umschlagentwicklung der relevanten Ladungsarten**

In den deutschen Binnenhäfen tragen Schüttgüter mit 75 % im Jahr 2021 den wesentlichen Anteil des Gesamtumschlags der relevanten Ladungsarten bei. Auch hier wird die Entwicklung durch globale und nationale Trends beeinflusst, weshalb beispielsweise der geplante Kohleausstieg gravierende Auswirkungen auf die Menge im Schüttgutsegment bewirkt. Trotz der erwarteten positiven Entwicklung des Containerumschlags, wird in der Gesamtbetrachtung zunächst ein negatives Wachstum der Umschlagmenge deutlich. Die Umschlagmengen im Bereich RoRo und Sonstige Ladung zeigen einen weitestgehend konstanten Verlauf ohne signifikante erwartete Änderungen in der Trendfortschreibung.

Die Abbildung 6 zeigt die reale Umschlagentwicklung der deutschen Binnenhäfen zwischen 2014 und 2021 sowie die erwartete Umschlagmenge bis 2040. Die Gesamtumschlagmenge der relevanten Ladungsarten beträgt im Jahr 2021 etwa 146 Mio. Tonnen. Basierend auf der erwarteten Trendentwicklung der einzelnen Ladungsarten wird bis zum Jahr 2040 ein Umschlagpotenzial von 100 Mio. Tonnen ausgewiesen.

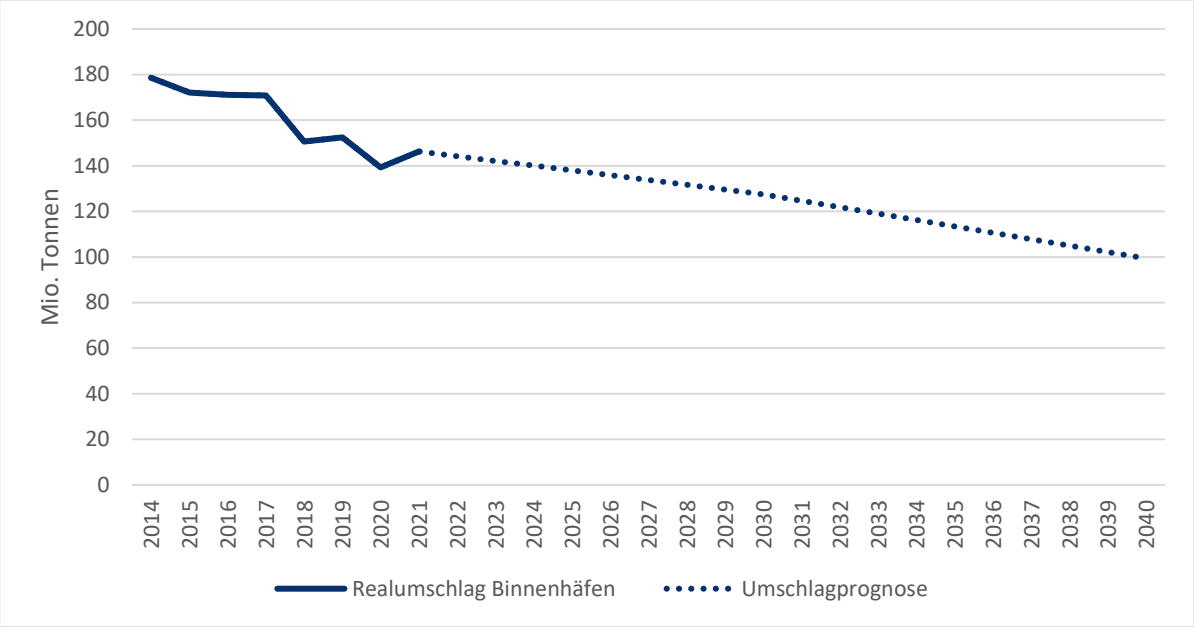



**Abbildung 6 | Binnenhäfen Umschlagentwicklung der relevanten Ladungsarten**

### 2.2.3 Fortschreibung des Gerätebestandes

Die Fortschreibung des Gerätebestandes erfolgt grundsätzlich auf Basis der zuvor ermittelten Produktivität je Gerätetyp. Die Umschlagentwicklung der Ladungsarten kann somit auf die Entwicklung des Gerätebestandes projiziert werden. Analog zu dem Gerätebestand im Status quo werden die Geräte differenziert für die See- und Binnenhäfen ausgewiesen. Im Rahmen dieses Abschnitts werden keine Automatisierungsvorhaben berücksichtigt, dieser Aspekt wird im Rahmen des Substitutionspotenzials aufgefasst.

<u>Seehäfen</u>

Die Tabelle 4 zeigt die Bestandsentwicklung der Umschlaggeräte nach Leistungsmerkmal bis 2030 und 2040. Für die Umschlaggeräte, die mit dem Containerumschlag in direkter Verbindung stehen (Van / Straddle Carrier, AGV, Reachstacker, Leercontainerstapler), wird eine Zunahme im Gerätebestand erwartet. Im Bereich der Stapler und Mobilkrane variiert dies insbesondere aufgrund der unterschiedlichen Entwicklungskorridore der einzelnen Ladungsarten.

Für die Seehäfen ergibt sich die folgende Bestandsentwicklung der Umschlaggeräte.

| Gerätetyp | Leistungsmerkmal | Gerätebestand im Status quo (31.12.2021) | Fortschreibung 2030 | Fortschreibung 2040 |
|---|---|---|---|---|
| Van / Straddle Carrier | | 588 | 711 | 805 |
| Automated Guided Vehicles (AGV) | | 91 | 110 | 125 |
| Reachstacker | | 81 | 97 | 110 |
| Leercontainerstapler | | 31 | 37 | 42 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Stapler | 6 – 12 t | 531 | 499 | 551 |
| | > 12 t | 114 | 103 | 118 |
| Terminal-Zugmaschine | 4x2 | 61 | 68 | 70 |
| | 4x4 | 277 | 304 | 308 |
| Hafenmobilkran | <250 kW | 13 | 16 | 12 |
| | 251-450 kW | 18 | 21 | 20 |
| | 451-650 kW | 7 | 6 | 5 |
| | > 650 kW | 33 | 28 | 25 |

**Tabelle 4 | Seehäfen: Bestandsentwicklung der Umschlaggeräte 2030 und 2040**

Binnenhäfen

Für die Binnenhäfen wird die Produktivität vollständig zur Fortschreibung des Gerätebestandes hinzugezogen. Die Tabelle 5 zeigt den Gerätebestand im Status quo sowie die Fortschreibung für die Jahre 2030 und 2040 je Gerätetyp und Leistungsmerkmal.

Wie bereits im Rahmen der erwarteten Umschlagmengenentwicklung erläutert, wird ein positives Wachstum im Containersegment erwartet. Dieses hat zwar keinen signifikanten Einfluss auf den Kurvenverlauf in der Gesamtumschlagsbetrachtung, jedoch wird dies im Anstieg der Umschlaggeräte deutlich, die im Wesentlichen für den Containerumschlag eingesetzt werden und entsprechend mit dieser Umschlageentwicklung verknüpft sind. Demnach ist insbesondere im Bereich der Reachstacker, Leercontainerstapler und Terminal-Zugmaschinen ein Anstieg der Geräteanzahl zu erwarten.

Das prognostizierte negative Wachstum im Segment der Schüttgüter und der sonstigen Ladung zeigt hingehen den Einfluss auf die benötigten Hafenmobilkrane sowie Stapler. Hier wird jeweils ein leichter Rückgang der Geräte erwartet. Auch wenn der Gerätebestand hier rückläufig erscheint, so ist dies lediglich auf die im Rahmen dieser Studie berücksichtigten Geräte abgebildet. Die Entwicklung weiterer für diese Ladungsarten relevanten Geräte, wie Mobilbagger, Radlader, Portalkrane, Stapler (< 6 t), wird in diesem Zusammenhang nicht aufgezeigt.

| Gerätetyp | Leistungsmerkmal | Gerätebestand im Status quo (31.12.2021) | Fortschreibung 2030 | Fortschreibung 2040 |
|---|---|---|---|---|
| Van / Straddle Carrier | | 0 | 0 | 0 |
| Automated Guided Vehicles (AGV) | | 0 | 0 | 0 |
| Reachstacker | | 77 | 86 | 96 |
| Leercontainerstapler | | 31 | 36 | 40 |
| Stapler | 6 – 12 t | 17 | 13 | 10 |
| | > 12 t | 37 | 29 | 22 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Terminal-Zugmaschine | 4x2 | 13 | 15 | 17 |
| | 4x4 | 10 | 9 | 9 |
| Hafenmobilkran | <250 kW | 27 | 26 | 18 |
| | 251-450 kW | 9 | 9 | 5 |
| | 451-650 kW | 6 | 5 | 5 |
| | > 650 kW | 6 | 5 | 5 |

**Tabelle 5 | Binnenhäfen: Bestandsentwicklung der Umschlaggeräte 2030 und 2040**

## 2.3 $CO_2$-Emissionen des Gerätebestandes

Neben der Bestandanalyse der Umschlaggeräte in deutschen See- und Binnenhäfen, soll im Rahmen der Studie, die damit in Zusammenhang stehende jährliche $CO_2$-Emission ermittelt werden. In diesem Zusammenhang werden die durch die Energienutzung direkt verursachten Emissionen (Scope 1) ermittelt - indirekt verursachte Emissionen (Scope 2) werden nicht berücksichtigt, die Betrachtung von elektrobetriebenen Umschlaggeräten entfällt somit im Rahmen dieser Berechnung. Ebenso entfällt eine aus Gutachter- und Auftraggebersicht wünschenswerte Einordnung der Emissionen des Hafenumschlags in den ökologischen Fußabdruck des gesamten Hafens. Diese scheitert an einer fehlenden zusammenhängenden THG-Bilanzierung der verschiedenen im Hafen angesiedelten Wirtschaftsbereiche.

Für die Emissionsberechnung wird im Wesentlichen die Datenerhebung aus den Umfragerücklaufern ausgewertet und für eine Berechnung je Gerätetyp aufbereitet. In diesem Zusammenhang wurden Parameter wie Kraftstoffverbrauch (l), Betriebsstunden (Bh) sowie $CO_2$-Ausstoß (kg) je Gerätetyp von den Umschlagbetrieben abgefragt.

Wie bereits im Zusammenhang der Gerätebestandserfassung erläutert, wurde keine Vollerhebung aller Gerätetypen insbesondere im Bereich des Dieselverbrauchs und $CO_2$-Ausstoßes erreicht. Aus diesem Grund wird die Berechnung in zwei Bereiche unterteilt. Zum einen werden die konkreten Angaben der Terminalbetreiber auf Plausibilität überprüft und für die Gesamtsumme hinzugezogen. Zum anderen ist eine Hochrechnung der Emission für die nicht durch die Umfrage abgedeckten Umschlaggeräte erforderlich. Die Ermittlung der $CO_2$-Emission erfolgt im Wesentlichen auf Basis der Betriebsstunden, dem Dieselverbrauch und dem Parameter $CO_2$-Ausstoß je verbrauchtem Liter Diesel (kg/l).

Als Basis für die Hochrechnung werden die vorhandenen Daten zum Dieselverbrauch für jeden Gerätetyp separat erfasst und ins Verhältnis zu den Betriebsstunden gestellt. Die übergeordnete Berücksichtigung eines gewichteten Mittels zum Verbrauch ist nicht sinnvoll, da die verschiedenen Gerätetypen unterschiedliche Steigungsverläufe in Zusammenhang zwischen Dieselverbrauch und Betriebsstunde verzeichnen. Auf Basis der Datenlage wurde daher für jeden Gerätetyp eine lineare Funktion hergeleitet, um ein möglichst genaues Bild zu schaffen. Statistische Ausreißer wurden in dieser Betrachtung eliminiert, um das Bestimmtheitsmaß zu maximieren. Dieser Analyseschritt ist nicht standortspezifisch zu bewerten, weshalb die Datenlage über alle See- und Binnenhäfen hinzugezogen wurde. Lediglich in Bezug auf die Leercontainerstapler war die Datenmenge für die Herleitung einer Funktion unzureichend bzw. lediglich mit einem sehr

geringen Bestimmtheitsmaß möglich, weshalb hier nach eingehender Plausibilitätsprüfung das gewichtete Mittel hinzugezogen wurde.

Die Abbildung 7 bestätigt die unterschiedlichen Steigungsverläufe je Umschlaggerät in Bezug auf Verbrauch und Betriebsstunden am Beispiel der betrachteten Flurförderzeuge.

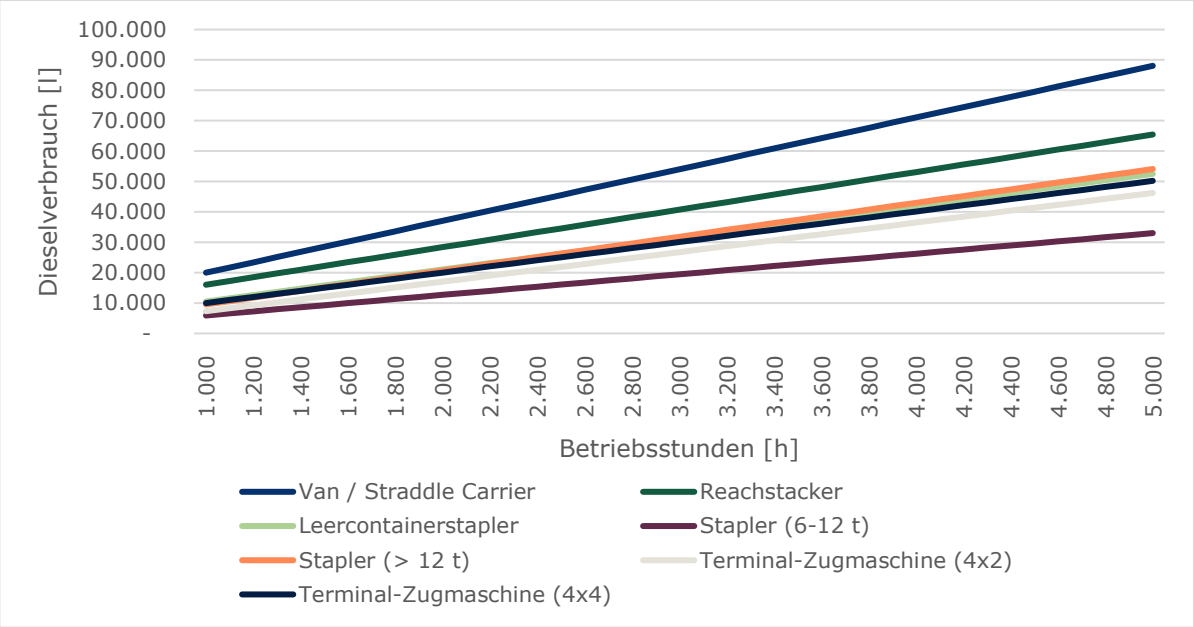



**Abbildung 7 | Dieselverbrauch im Verhältnis zu Betriebsstunden je Gerätetyp**

Als weiterer Parameter sind die Betriebsstunden je Gerätetyp für die Ermittlung der $CO_2$-Emission erforderlich. Tatsächliche Angaben zu den Ist-Betriebsstunden aus der Umfrage werden berücksichtigt. Für die übrigen Geräte wird der gewichtete Durchschnitt berücksichtigt, wobei dieser für See- und Binnenhäfen gesondert ermittelt wurde.

Auf Basis der nunmehr hergeleiteten Funktion zum Verbrauch und der jeweils vorhandenen tatsächlichen oder im Mittel berücksichtigten Betriebszeit lässt sich der Verbrauch je Gerätetyp ermitteln und schließlich mit den tatsächlichen Angaben zum Verbrauch aus der Umfrage summieren.

Wie bereits angedeutet, ist die Datenverfügbarkeit zur $CO_2$-Emission je Gerätetyp lediglich sehr begrenzt verfügbar. Insbesondere je Gerätetyp lassen sich keine belastbaren Funktionen analog zur Ermittlung des Dieselverbrauchs ableiten. Die kombinierte Betrachtung aus $CO_2$-Emission und Dieselverbrauch ist jedoch über alle Gerätetypen möglich und zielführend.

Auf Basis der vorhandenen Datenlage wurde daher eine lineare Funktion hergeleitet, um ein möglichst genaues Bild zu schaffen. Statistische Ausreißer wurden erneut eliminiert, um das Bestimmtheitsmaß zu maximieren. Analog zu dem zuvor ermittelten Dieselverbrauch im Verhältnis zu den Betriebsstunden, ist dieser Analyseschritt nicht standortspezifisch zu bewerten, weshalb die Datenlage über alle See- und Binnenhäfen hinzugezogen wurde.

Die Abbildung 8 zeigt die $CO_2$-Emission im Verhältnis zum Dieselverbrauch. Auf Basis dieser Funktion lässt sich schließlich die Emission der einzelnen Gerätetypen in den See- und Binnenhäfen sowohl im Status quo als auch in Bezug auf die Bestandsentwicklung ableiten.

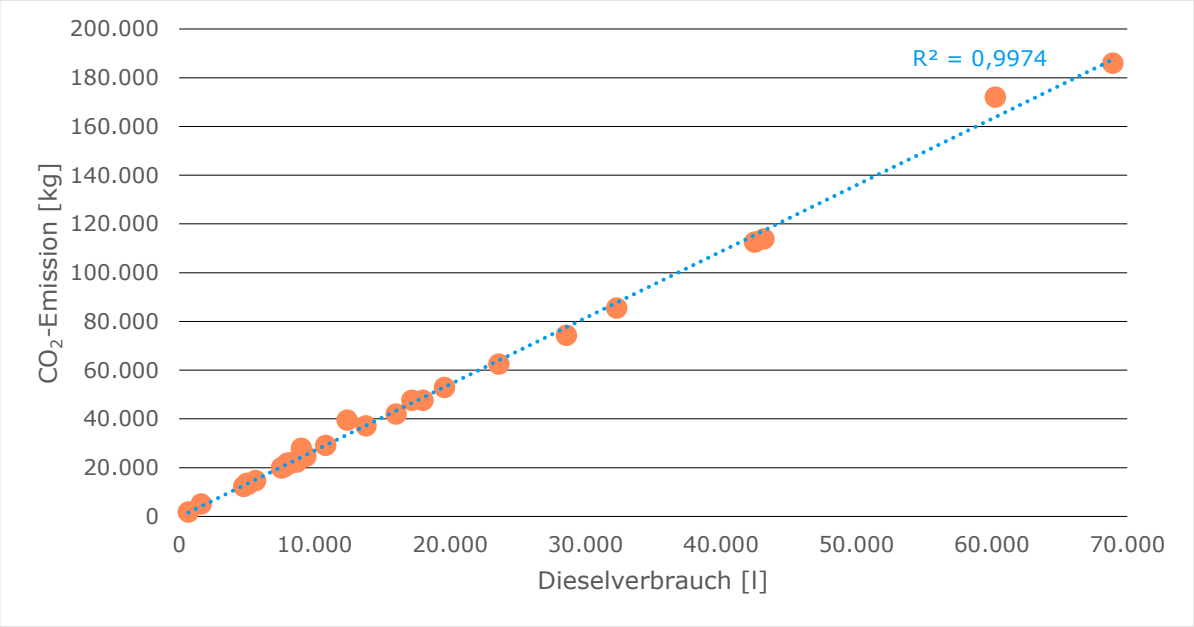



**Abbildung 8 | $CO_2$-Emission im Verhältnis zu Dieselverbrauch**

Für die Ermittlung der erwarteten $CO_2$-Emission des herausgestellten Gerätebestandes 2030 und 2040 werden die durchschnittlichen Betriebsstunden pro Jahr und die erzeugte Funktion zum Verhältnis des Dieselverbrauchs zu den Betriebsstunden hinzugezogen. Die Ableitung der $CO_2$-Emission erfolgt schließlich in bekannter Form.

Grundsätzlich wird der bekannte Antriebsmix im Status quo fortgeschrieben. Angestrebte Elektrifizierungs- und Automatisierungsvorhaben, werden im Rahmen der Substitutionsanalyse in Kapitel 4 berücksichtigt.

<u>Seehäfen</u>

Im Jahr 2021 wurden in den deutschen Seehäfen insgesamt etwa 155 Mio. kg $CO_2$ emittiert. Unter Berücksichtigung der hier ausgewiesenen Gerätebestandsentwicklung würde dies bis 2030 einen Anstieg auf 177 Mio. kg bedeuten, welcher sich bis 2040 auf mehr als 195 Mio. kg ausweiten würde.

In den vorangegangenen Abschnitten wurde bereits auf die Umschlagmengen und den damit einhergehenden Gerätebestand eingegangen. Das Container- und RoRo-Segment dominiert in den Seehäfen, gemessen an der Umschlagmenge, was sich wiederum in der Anzahl der damit in Verbindung stehenden Umschlaggeräte widerspiegelt. Gleichzeitig wird dies Verbrauch und $CO_2$-Emission projiziert.

Die Abbildung 9 verdeutlicht die $CO_2$-Emission der Betrachtungsjahre unter Berücksichtigung der Anteile der jeweiligen Gerätetypen.

Die Van / Straddle Carrier tragen hierbei den größten Anteil am Dieselverbrauch. Etwa 70 % der gesamten $CO_2$-Emission in den deutschen Seehäfen ist auf dieselbetriebene Van / Straddle Carrier zurückzuführen – Tendenz steigend. Das entspricht einer Emission von fast 110 Mio. kg $CO_2$ im Jahr 2021. Weitere 7 % sind dem Betrieb von Reachstacker, AGV und Leercontainerstaplern, die ebenfalls in direktem Bezug zum Containerumschlag stehen.

Der Einsatz von Staplern und Terminal-Zugmaschinen geht in 2021 mit einem Ausstoß von jeweils etwa 15 Mio. kg $CO_2$ einher, was insgesamt weitere 19 % an der gesamten $CO_2$-Emission in den Seehäfen bedingt. Es wird eine Zunahme der Emission bis 2040 erwartet, wobei der Anteil an der gesamten Emissionsmenge leicht sinkt. Der Betrieb der Hafenmobilkrane verursachte im Jahr 2021 mehr als 6 Mio. kg $CO_2$.

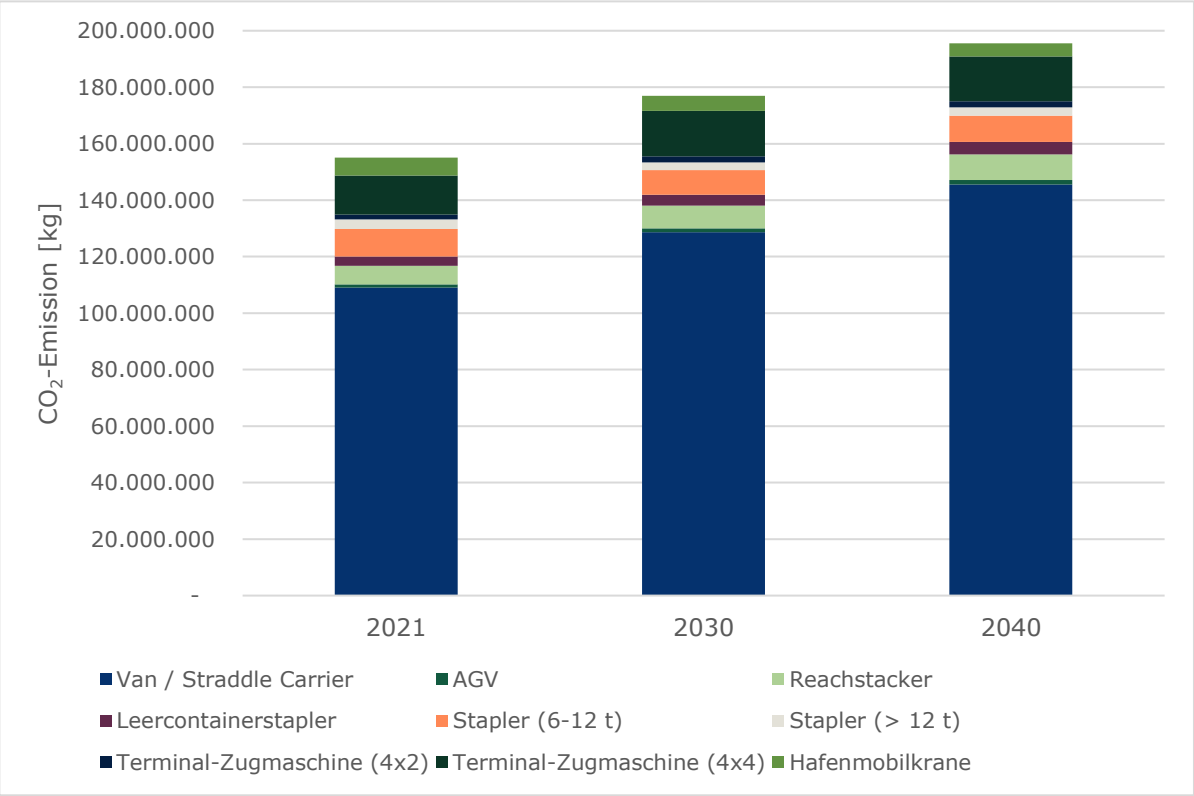



**Abbildung 9 | Seehäfen: $CO_2$-Emission des Gerätebestandes im Status quo, 2030 und 2040**

Binnenhäfen

Auf Basis des Gerätebestandes und des ausgewiesenen Antriebsmixes, wurden im Jahr 2021 in den deutschen Binnenhäfen mehr als 12 Mio. kg $CO_2$ emittiert. Bis 2030 wird auf Basis der Gerätebestandsentwicklung eine $CO_2$-Emission von mehr als 13 Mio. kg erwartet, welche ohne Substitutionsvorhaben bis 2040 auf über 14 Mio. kg $CO_2$ ausgeweitet würde.

Der wesentliche Anteil ist dem Betrieb von Reachstackern zuzuordnen. Fast 60 % der durch Umschlaggeräte in Binnenhäfen verursachte $CO_2$-Emission ist diesem Gerätetyp zuzuschreiben. Weitere 1,4 Mio. kg $CO_2$ werden durch den Einsatz von Leercontainerstaplern emittiert. Aufgrund des erwarteten Umschlagwachstums im Containersegment werden hier eine Zunahme bis 2040 erwartet.

Stapler und Terminal-Zugmaschinen weisen insgesamt einen vergleichsweisen geringen Anteil von 12 % an der Gesamtemission aus. Aufgrund des tendenziell erwarteten negativen Wachstums in diesem Segment, ist hier keine Zunahme zu erwarten. Der Betrieb der Hafenmobilkrane verursachte im Jahr 2021 eine $CO_2$-Emission von mehr als 2,5 Mio. kg.

In den deutschen Binnenhäfen besteht derzeit ein höherer Grad der Elektrifizierung. Insbesondere im Bereich der Stapler und Hafenmobilkrane werden hier prozentual mehr elektrobetriebene Geräte ausgewiesen als in den Seehäfen.

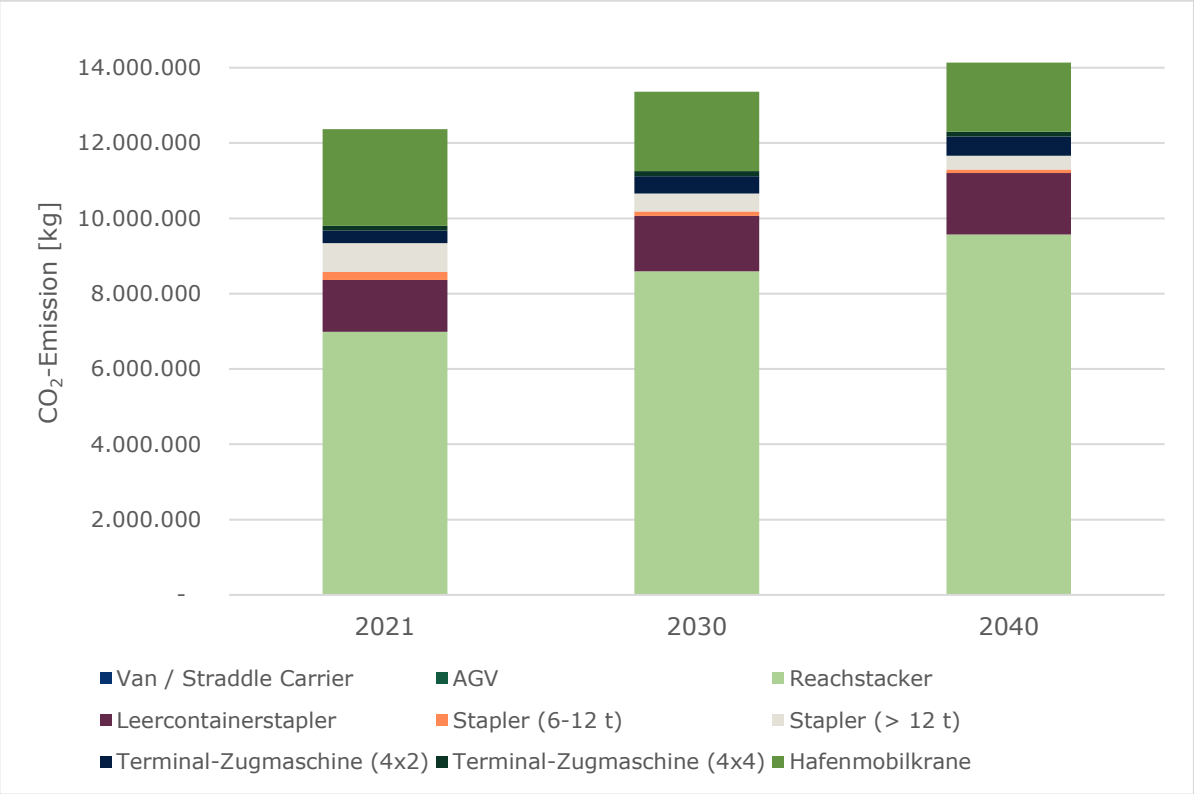



**Abbildung 10 | Binnenhäfen: $CO_2$-Emission des Gerätebestandes im Status quo, 2030 und 2040**

# 3. ANALYSE ALTERNATIVER TECHNOLOGIEN FÜR HAFENUMSCHLAGGERÄTE

Die Analyse alternativer Technologien für Hafenumschlaggeräte erfolgt für die in Kapitel 2.1 genannten Gerätetypen. Auf dem Markt für Hafenumschlaggeräte haben sich in den vergangenen Jahren verschiedene Konzepte hervorgetan. Der Untersuchungsumfang umfasst folgende, als besonders relevant eingeschätzte, alternative Antriebstechnologien:

- Wasserstoff-Brennstoffzellen
- Vollelektrische Antriebe mit Lithium-Ionen-Batterien
- Verbrennung mit synthetischem Diesel

Um einem technologieoffenen Untersuchungsansatz zu entsprechen, wird neben den genannten alternativen Technologien auch ein Screening der Forschungs- und Entwicklungslandschaft auf dem Gebiet weiterer Antriebe vollzogen. Hierbei handelt es sich v. a. um den Einsatz von Methanol und Ammoniak in Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen.

Als Benchmark für die Bewertung der alternativen Technologien dienen folgende herkömmliche Antriebsarten:

- Diesel
- Diesel-elektrisch
- Diesel-hydraulisch
- Hybrid

Die Analyse der alternativen Technologien wird anhand von insgesamt elf Analysekriterien vollzogen, die in Tabelle 6 aufgelistet sind. Für die aus der Analyse hervorgehende Bewertung der Analysekriterien wird eine Form der Nutzwertanalyse angewandt. Die Anwendung dieser Analyseform erlaubt eine kombinierte Bewertung sowohl von quantitativen als auch qualitativen Aspekten. In Abhängigkeit des Kriteriums und der Datenverfügbarkeit erfolgt die Bewertung somit auf qualitativer oder quantitativer Ebene. Für die Gesamtbewertung wird eine fünfstufige Skala von „bedeutend besser" bis „bedeutend schlechter" hinzugezogen. Als Referenzwert („gleich") sind die oben genannten Antriebs-Benchmarks für den jeweiligen Gerätetyp zu betrachten. Um schließlich eine zielführende Bewertung ableiten zu können, wird die ordinale Bewertung mit Punktwerten versehen.

In die Bewertung der Analysekriterien flossen sowohl die Einschätzungen der Mitglieder der Arbeitsgruppe „Alternative Antriebe für Hafenumschlagsgeräte" des Hafennetzwerks e4ports als auch die Angaben aus Gesprächen mit Geräteherstellern ein. Nachdem jedes Kriterium individuell analysiert und basierend auf der Punktewert-Skala bewertet wurde, soll als Basis für die Potenzialanalyse zur Substitution der Geräteflotte durch Equipment mit alternativen Antrieben (siehe auch Kapitel 4) zudem eine gewichtete Gesamtbewertung vorgenommen werden. Die herangezogene Gewichtung reflektiert die heutige Einschätzung der an der obengenannten Arbeitsgruppe beteiligten Akteure. Die erhaltenen Rückmeldungen wurden dabei gemittelt. Die Gewichtung steht bereits heute nicht stellvertretend für alle beteiligten Umschlagunternehmen, da sich die Prioritäten aufgrund der Rahmenbedingungen an den einzelnen Standorten teilweise deutlich unterscheiden können. Zudem sind die Anforderungen und die damit einhergehende Gewichtung auch im Laufe der Zeit als dynamisch zu betrachten.

| | |
|---|---|
| **1** \| Technologische Reife | a) Geräteverfügbarkeit auf dem Markt |
| | b) Im Sinne des zuverlässigen Betriebs |
| **2** \| Technische Parameter | a) Geschwindigkeit (Fahrt und Heben, Senken) |
| | b) Beschleunigung (Fahrt und Heben, Senken) |
| | c) Nebenzeiten (ver-/entriegeln, hochfahren) |
| | d) Maße |
| | e) Gewicht |
| **3** \| Betriebszeit | a) Laufleistung |
| | b) Zeit für Wiederherstellung der Laufleistung |
| | c) Zeit für planmäßige Instandsetzung |
| **4** \| Gerätekosten | a) Anschaffungskosten |
| | b) Betriebskosten (Energiekosten, Kosten für sonstige Betriebsmittel) |
| | c) Planmäßige M&R-Kosten |
| | d) Secondhand-Marktwert/ Entsorgung/Recyclingkosten |
| **5** \| Benötigte Infrastruktur | a) Infrastrukturkosten (für 1-n Geräte) |
| | b) Flächenverbrauch ($m^2$) |
| **6** \| Automatisierungspotenzial | |
| **7** \| Risiken für Aufrechterhaltung des Regelbetriebs | |
| **8** \| Sicherheitsaspekte (Arbeitsschutz) (bei RoRo auch auf Seite des Schiffes, z. B. Brandschutz) | |
| **9** \| Emissionen | a) Lokal (NOx, SOx, PM) |
| | b) THG |
| | c) Lärm |
| **10** \| Sonstige Einstiegshürden | |
| **11** \| Nachhaltigkeit | a) Ressourcenverbrauch (z. B. Batteriegröße, seltene Erden) |
| | b) i) Gesamtwirtschaftliche Abhängigkeit |
| | b) ii) Gesamtwirtschaftlich (Lifecycle-Emissionen) |
| | c) Weitere ethische Aspekte |

**Tabelle 6 | Analysekriterien für die Bewertung der alternativen Technologien**

Das Bewertungssystem der Analysekriterien alternativer Technologien ist in Abbildung 11 dargestellt. Die fünfstufige, ordinalskalierte Bewertung im Vergleich zum Performance-Benchmark (herkömmliches Gerät mit dieselbasiertem Antrieb) ist jeweils mit einem Punktwert zwischen 10 und 50 verbunden. Bei den Analysekriterien mit mehreren Unterkriterien werden diese jeweils einzeln bewertet und zu einer Gesamtbewertung des Analysekriteriums kombiniert.

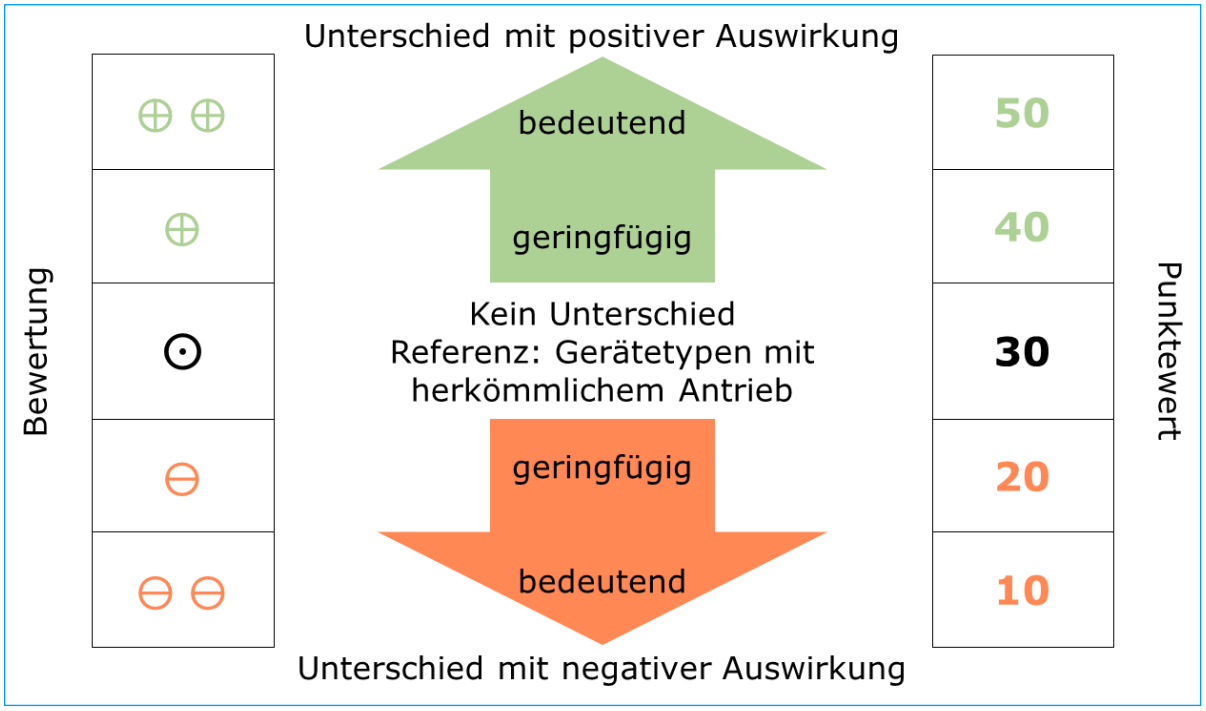



**Abbildung 11 | System für die Bewertung der Analysekriterien**

Die nicht repräsentative, auf den heutigen Einschätzungen der rückmeldenden Akteure der Arbeitsgruppe „Alternative Antriebe für Hafenumschlagsgeräte" des Hafennetzwerks e4ports basierende Gewichtung der Analysekriterien ergab das in Tabelle 7 dargestellte Ergebnis für die untersuchten Gerätetypen. Aus der Verrechnung mit dem Punktwert ergibt sich der gewichtete Punktwert für das jeweilige Kriterium. Die Summe aller gewichteten Punktwerte ergibt wiederum die Gesamtbewertung einer alternativen Antriebstechnologie für den jeweiligen Gerätetyp.

Die Kriterien Sicherheitsaspekte, technologische Reife und Nachhaltigkeit wurden aus den nachfolgend erläuterten Gründen nicht in die Gewichtung und Gesamtbewertung einbezogen:

- Sicherheitsaspekte: Die Erfüllung grundlegender Sicherheitsanforderungen wird als Grundvoraussetzung angenommen. Die Besonderheiten je nach Gerätetyp und Antriebskonzept werden in der Studie beschrieben.
- Technologische Reife: Die technische Reife wird als Bedingung für die Markteinführung neuer Geräte angesehen. Zur Veranschaulichung des aktuellen Entwicklungsstands wird das Technology Readiness Level (TRL) bestimmt.
- Nachhaltigkeit: Die Nachhaltigkeit wird als übergeordnetes Kriterium untersucht, aufgrund inkomparabler Einflussfaktoren ist allerdings selbst eine ordinale Bewertung nicht zielführend.

| Analysekriterium | Straddle Carrier | | AGV | | Reach-stacker | | Leer-container-stapler | | Gabelstapler | | Zug-maschinen | | Hafenmobil-krane | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | % | Rang | % | Rang | % | Rang | % | Rang | % | Rang | % | Rang | % | Rang |
| Gerätekosten | 13,8 | 3 | 15,2 | 1 | 16,1 | 1 | 14,3 | 2 | 17,4 | 1 | 13,8 | 3 | 19,6 | 1 |
| Betriebszeit | 15,6 | 1 | 13,4 | 3 | 15,2 | 2 | 14,3 | 2 | 15,2 | 2 | 12,5 | 5 | 17,0 | 2 |
| Risiken Regelbetrieb | 15,2 | 2 | 12,5 | 6 | 12,8 | 4 | 15,2 | 1 | 10,3 | 6 | 17,4 | 1 | 8,0 | 7 |
| Technische Parameter | 12,5 | 6 | 13,4 | 3 | 14,6 | 3 | 13,4 | 4 | 15,2 | 2 | 9,4 | 7 | 17,0 | 2 |
| Benötigte Infrastruktur | 12,9 | 4 | 14,3 | 2 | 12,2 | 5 | 12,1 | 5 | 13,4 | 4 | 10,7 | 6 | 12,5 | 5 |
| Emissionen | 7,6 | 8 | 8,0 | 8 | 11,0 | 6 | 9,8 | 8 | 10,7 | 5 | 15,2 | 2 | 13,4 | 4 |
| Sonstige Einstiegshürden | 9,4 | 7 | 9,8 | 7 | 10,4 | 7 | 10,7 | 6 | 9,8 | 7 | 12,9 | 4 | 9,8 | 6 |
| Automatisierungspotenzial | 12,9 | 4 | 13,4 | 3 | 7,7 | 8 | 10,3 | 7 | 8,0 | 8 | 8,0 | 8 | 2,7 | 8 |

**Tabelle 7 | Gewichtung der Analysekriterien nach Gerätetypen**

Nachfolgend wird zunächst die Marktverfügbarkeit der relevanten alternativen Technologien für Hafenumschlaggeräte ermittelt, um diese anschließend anhand der Analysekriterien mit Blick auf die unterschiedlichen Gerätetypen zu untersuchen. Als Informationsquellen dienten zum einen die ausführliche Recherche von Produktdatenblättern der aus der Bestandsanalyse bekannten, führenden Hersteller (siehe auch Abbildung 12), zum anderen wurden die praktischen Erfahrungen der Anwender aus der genannten Arbeitsgruppe erfasst und einbezogen.

| Gerätehersteller | Van/Straddle Carrier | Reachstacker | Leercontainer-stapler | Stapler | Zugmaschinen | Hafenmobil-krane | AGV |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| COMBILIFT LIFTING INNOVATION | ✓ | | | ✓ | | | |
| CVS FERRARI | | ✓ | ✓ | ✓ | | | |
| HYSTER | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | |
| KALMAR | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |
| KONECRANES | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ |
| LIEBHERR | | ✓ | | | | ✓ | |
| Linde | | | | ✓ | | | |
| MANTSINEN | | | | | | ✓ | |
| SENNEBOGEN | | | | | | ✓ | |
| TERBERG | | | | | ✓ | | |
| TOYOTA MATERIAL HANDLING | | | | ✓ | | | |

**Abbildung 12 | Übersicht der untersuchten Gerätehersteller und ihrer Abdeckung der Umschlaggeräte**

Zudem wurden ausgewählte Gerätehersteller zu den Perspektiven alternativer Technologien interviewt. Die Auswahl ergab sich aus dem in der Umfrage unter den Umschlagbetrieben erfassten Herstellermix (siehe Abbildung 13) der in Betrieb befindlichen Geräte und den von den Herstellern angebotenen Gerätetypen (Abdeckung aller Gerätetypen).

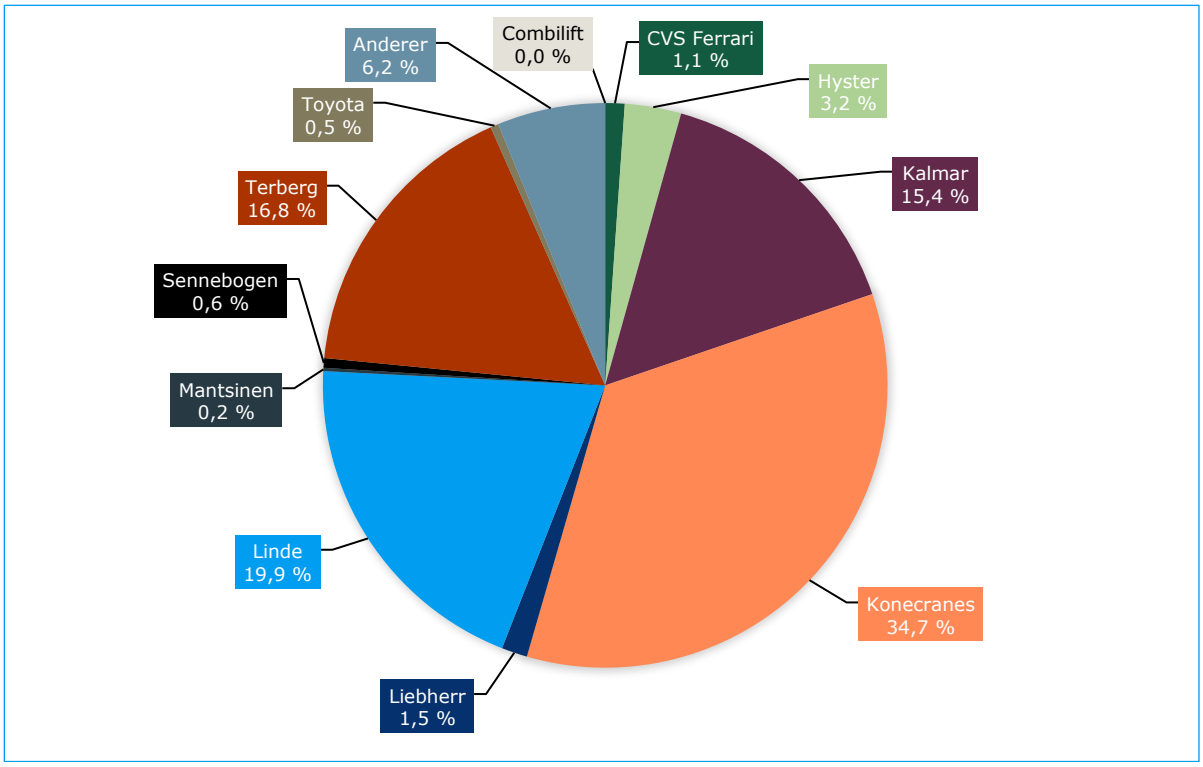



**Abbildung 13 | Herstellermix (prozentuale Gesamtbetrachtung) in den See- und Binnenhäfen über alle Geräte**

### 3.1 Marktverfügbarkeit alternativer Technologien für Hafenumschlaggeräte

Um eine Analyse und Bewertung zuzulassen, sind zunächst die relevanten Gerätetyp-Antrieb-Kombinationen im Bereich der eingangs genannten alternativen Technologien für Hafenumschlaggeräte zu identifizieren. Betrachtet werden sollen unter Angabe der Gerätehersteller sowohl die bereits am Markt erhältlichen als auch in der Entwicklung befindliche Alternativen. Der Fokus liegt dabei auf dem europäischen Markt.

Für die Nutzung von synthetischem Diesel wird angenommen, dass heutige Hafenumschlaggeräte, ggf. verbunden mit geringfügigen technisch-operativen Anpassungen, weiterverwendet werden können und ein hinreichendes Geräteangebot somit durch Hersteller, die bereits Geräte mit herkömmlichem Antrieb anbieten, besteht.

Im Bereich der Wasserstoffbrennstoffzellen-Antriebe können insbesondere die Stapler bereits als am Markt etabliert bewertet werden. Mit Hyster, Linde und Toyota haben führende Hersteller Geräte mit Polymerelektrolytbrennstoffzelle bereits im Portfolio. Daneben bietet die Firma Gaussin bereits wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-AGVs an **[07]**. In der Entwicklung und Erprobung befinden sich dagegen bereits eine Reihe von Wasserstoffbrennstoffzellen-Zugmaschinen. Im Hafen von Valencia läuft ein Projekt zur Erprobung eines entsprechenden Geräts des Herstellers Atena **[08]**, zudem hat Terberg bereits in Rotterdam und Antwerpen ein Brennstoffzellenmodell der YT203-Zugmaschine erprobt **[09]**. Die Firma Hyster wird planmäßig Ende 2022 / Anfang 2023 eine Terminalzugmaschine und einen Leercontainerstapler an die HHLA ausliefern, die diese in der Praxis testen wird **[10]**. Hyster lässt im Hafen von Valencia zudem einen Wasserstoff-Reachstacker erproben. Neben den brennstoffzellengestützten Wasserstoffkonzepten entwickelt die Firma CMB.TECH zudem eine Zugmaschine sowie einen Straddle Carrier mit Dual-Fuel-Verbrennungsmotor **[11]**.

Eine deutlich größere Verfügbarkeit und Marktdurchdringung weisen dagegen vollelektrische Antriebslösungen für Hafenumschlaggeräte auf. Es gibt für jeden der betrachteten Gerätetypen mindestens einen Hersteller, der ein entsprechendes Gerät anbietet. Einschränkungen in der Verfügbarkeit ergeben sich heute v. a. noch in den oberen Leistungsbereichen, bspw. bei Leercontainerstaplern, wo der einzige Anbieter Kalmar bisher lediglich ein Modell mit geringer Tragfähigkeit und Stapelhöhe führt.

Die Anwendungen für Ammoniak und Methanol als Kraftstoff befinden sich heute i. d. R. noch in der Entwicklung, die mit Direktmethanolbrennstoffzellen betriebenen Stapler des südkoreanischen Herstellers Gaoncell stellen eine Ausnahme dar **[12]**. Den Einsatz von Ammoniak in Hafenumschlaggeräten treibt die Firma Letaq voran, die mit Hybridsystemen (Verbrennungsmotor, Batterie und Elektromotor) ausgestattete Reachstacker, Leercontainerstapler und Gabelstapler entwickelt **[13]**.

Die Ergebnisse der Auswertung der Marktverfügbarkeit finden sich getrennt nach Gerätetypen im nachfolgenden Unterkapitel zur technologischen Reife (siehe Tabelle 8 bis Tabelle 14). Neben der Marktverfügbarkeit wird für die identifizierten Gerätetyp-Antrieb-Kombinationen auch der technologische Reifegrad dargestellt.

## 3.2 Untersuchung der Analysekriterien

### 3.2.1 Technologische Reife

Die technologische Reife wird als eine der Grundvoraussetzungen für die Markteinführung neuer Geräte angesehen. Zur Veranschaulichung des aktuellen Entwicklungsstands der bereits in Kapitel 3.1 identifizierten alternativen Technologien für Hafenumschlaggeräte wird das TRL bestimmt. Das TRL ist eine ursprünglich von der NASA für die Bewertung von Raumfahrttechnologien entwickelte Systematik, die mittlerweile verstärkt zur Bewertung des Entwicklungsstandes von neuen Technologien genutzt wird. Die Bedeutung der insgesamt neun Stufen ist in Abbildung 14 beschrieben.

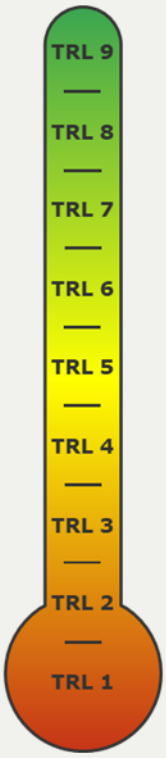
| TRL-Skala | Beschreibung | |
|---|---|---|
|   | **TRL 9:** | Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes |
| | **TRL 8:** | Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich |
| | **TRL 7:** | Prototyp im Einsatz |
| | **TRL 6:** | Prototyp in Einsatzumgebung |
| | **TRL 5:** | Versuchsaufbau in Einsatzumgebung |
| | **TRL 4:** | Versuchsaufbau im Labor |
| | **TRL 3:** | Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie, *Proof of Concept* |
| | **TRL 2:** | Beschreibung des Technologiekonzepts bzw. der Anwendung einer Technologie |
| | **TRL 1:** | Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips |

**Abbildung 14 | Bedeutung der TRL zur Bewertung des Entwicklungsstands neuer Technologien [46]**

In den nachfolgenden Darstellungen (siehe Tabelle 8 bis Tabelle 14) werden neben der zuvor (siehe auch Kapitel 3.1) bereits beschriebenen (perspektivischen) Marktverfügbarkeit der verschiedenen Gerätetyp-Antriebs-Kombinationen die TRL bestimmt. Für bereits am Markt erhältliche Geräte wird eine vollständig ausgeprägte technologische Reife (TRL 9) vorausgesetzt. Die weiteren Einschätzungen werden auf Basis der Gespräche mit Geräteherstellern sowie der eigenen Recherche zu Pilot- und Entwicklungsvorhaben getroffen. Die TRL-Bewertungen, als Indikatoren des aktuellen Entwicklungsstands, dienen im weiteren Untersuchungsverlauf als Grundlage für die Prognose der erwartbaren Markteintrittszeitpunkte alternativer Technologien, die heute noch nicht marktreif sind.

| **AGV** | (Synthetischer) Diesel | Wasserstoff | | Vollelektrisch | Ammoniak / Methanol | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Gerätehersteller | | Verbrenner | Brennstoff-zelle | | Verbrenner | Brennstoff-zelle |
| Kalmar | | | | TRL 9 | | |
| Konecranes | TRL 9 | | | | | |
| **Sonstige:** | | | | | | |
| Gaussin | | | TRL 9 | | | |

**Legende:** Gerätetyp wird bereits angeboten | Aktive Entwicklung des Gerätetyps bekannt | F & E / keine Aktivitäten bekannt

**Tabelle 8 | Herstellerangebot, Perspektiven und technologischer Reifegrad alternativ angetriebener AGVs**

| **Gabelstapler** | (Synthetischer) Diesel | Wasserstoff | | Vollelektrisch | Ammoniak / Methanol | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Gerätehersteller | | Verbrenner | Brennstoff-zelle | | Verbrenner | Brennstoff-zelle |
| Combilift | TRL 9 | | | TRL 9 | | |
| CVS Ferrari | | | | | | |
| Hyster | | | TRL 9 | TRL 9 | | |
| Kalmar | | | | | | |
| Konecranes | | | | | | |
| Linde | | | TRL 9 | | | |
| Toyota | | | | | | |
| **Sonstige:** | | | | | | |
| Gaoncell | | | TRL 9 | | | Methanol TRL 9 |
| Letaq | | | | | Ammoniak TRL 4 | |

**Legende:** Gerätetyp wird bereits angeboten | Aktive Entwicklung des Gerätetyps bekannt | F & E / keine Aktivitäten bekannt

**Tabelle 9 | Herstellerangebot, Perspektiven und technologischer Reifegrad alternativ angetriebener (Schwerlast-)Gabelstapler**

| **Hafenmobilkrane** | (Synthetischer) Diesel | Wasserstoff | | Vollelektrisch (inkl. Netzanschluss) | Ammoniak / Methanol | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Gerätehersteller | | Verbrenner | Brennstoff-zelle | | Verbrenner | Brennstoff-zelle |
| Konecranes | TRL 9 | | | TRL 9 | | |
| Liebherr | | | | | | |
| Mantsinen | | | | | | |
| Sennebogen | | | | | | |

**Legende:** Gerätetyp wird bereits angeboten | Aktive Entwicklung des Gerätetyps bekannt | F & E / keine Aktivitäten

**Tabelle 10 | Herstellerangebot, Perspektiven und technologischer Reifegrad alternativ angetriebener Hafenmobilkrane**

| **Leercontainer-stapler** | (Synthetischer) Diesel | Wasserstoff | | Vollelektrisch | Ammoniak / Methanol | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Gerätehersteller | | Verbrenner | Brennstoff-zelle | | Verbrenner | Brennstoff-zelle |
| CVS Ferrari | TRL 9 | | | | | |
| Hyster | | | TRL 7 | | | |
| Kalmar | | | | TRL 8-9 | | |
| Konecranes | | | | | | |
| **Sonstige:** | | | | | | |
| Letaq | | | | | Ammoniak TRL 4 | |

**Legende:** Gerätetyp wird bereits angeboten | Aktive Entwicklung des Gerätetyps bekannt | F & E / keine Aktivitäten bekannt

**Tabelle 11 | Herstellerangebot, Perspektiven und technologischer Reifegrad alternativ angetriebener Leercontainerstapler**

| **Reachstacker** | (Synthetischer) Diesel | Wasserstoff | | Vollelektrisch | Ammoniak / Methanol | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Gerätehersteller | | Verbrenner | Brennstoff-zelle | | Verbrenner | Brennstoff-zelle |
| CVS Ferrari | TRL 9 | | | | | |
| Hyster | | | TRL 4-7 | | | |
| Kalmar | | | | TRL 8-9 | | |
| Konecranes | | | | TRL 4-7 | | |
| Liebherr | | | | | | |
| **Sonstige:** | | | | | | |
| Letaq | | | | | Ammoniak TRL 4 | |

**Legende:** Gerätetyp wird bereits angeboten | Aktive Entwicklung des Gerätetyps bekannt | F & E / keine Aktivitäten bekannt

**Tabelle 12 | Herstellerangebot, Perspektiven und technologischer Reifegrad alternativ angetriebener Reachstacker**

| **Straddle Carrier** | (Synthetischer) Diesel | Wasserstoff | | Vollelektrisch | Ammoniak / Methanol | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Gerätehersteller | | Verbrenner | Brennstoff-zelle | | Verbrenner | Brennstoff-zelle |
| Combilift | TRL 9 | | | TRL 8-9 | | |
| Kalmar | | | | | | |
| Konecranes | | | | TRL 4-7 | | |
| **Sonstige:** | | | | | | |
| CMB.TECH | | TRL 3-7 | | | | |
| ZPMC | | | TRL 4-7 | | | |

**Legende:** Gerätetyp wird bereits angeboten | Aktive Entwicklung des Gerätetyps bekannt | F & E / keine Aktivitäten bekannt

**Tabelle 13 | Herstellerangebot, Perspektiven und technologischer Reifegrad alternativ angetriebener Straddle Carrier**

| **Zugmaschinen** | (Synthetischer) Diesel | Wasserstoff | | Vollelektrisch | Ammoniak / Methanol | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Gerätehersteller | | Verbrenner | Brennstoff-zelle | | Verbrenner | Brennstoff-zelle |
| Hyster | | | TRL 7 | TRL 4-7 | | |
| Kalmar | TRL 9 | | | TRL 8-9 | | |
| Terberg | | | TRL 8 | | | |
| **Sonstige:** | | | | | | |
| Atena | | | TRL 4-7 | | | |
| CMB.TECH | | TRL 7 | | | | |
| Gaussin | | | TRL 9 | TRL 8-9 | | |

**Legende:** Gerätetyp wird bereits angeboten | Aktive Entwicklung des Gerätetyps bekannt | F & E / keine Aktivitäten bekannt

**Tabelle 14 | Herstellerangebot, Perspektiven und technologischer Reifegrad alternativ angetriebener Zugmaschinen**

### 3.2.2 Technische Parameter

Die Analyse der technischen Parameter erfolgte modell- und antriebsübergreifend auf Basis der Produktdatenblätter und Angaben der Gerätehersteller. Im Allgemeinen werden die heute bereits am Markt verfügbaren alternativ angetriebenen Hafenumschlaggeräte unter der Prämisse gebaut, das gleiche oder mindestens ein ähnliches technisches Leistungsniveau wie die herkömmlichen dieselbasierten Geräte zu erreichen. Die bisherigen Erfahrungen der Anwender spiegeln dieses Bild im Wesentlichen, wobei es antriebsspezifische Charakteristika gibt, wie die höhere Beschleunigung bei Elektromotoren.

Im Zusammenhang mit den technischen Parametern ist insbesondere bei den batterieelektrischen Antrieben festzuhalten, dass das aktuelle Geräteangebot nicht immer alle relevanten Leistungsbereiche abdeckt. Die Leistungsgrenzen sind heute stark vom Gerätetyp abhängig, bei leistungsintensiven Geräten, wie bspw. Reachstackern wird viel Energie benötigt und es ist ein starker Einfluss des Trade-offs zwischen der Leistungsfähigkeit der Geräte und einer wettbewerbsfähigen Laufzeit zu beobachten.

### 3.2.3 Betriebszeit

Bei den vollelektrischen Antriebssystemen können zwei Ladestrategien unterschieden werden:

- Opportunity Charging
- Out of Operation

Beim Opportunity Charging werden die Geräte immer dann geladen, wenn sie im operativen Betrieb gerade entbehrlich sind und sich somit eine Gelegenheit für einen Ladevorgang ergibt. Dieses Konzept besitzt eine hohe Affinität zur Automatisierung, bedarf bei größeren Terminals ggf. mehrerer Ladestationen. Im Vergleich zum Terminalbetrieb mit herkömmlich angetriebenen Geräten ist es wahrscheinlich, dass diese Ladestrategie aufgrund der Ladezeiten während des laufenden Betriebs eine Erhöhung der Gesamtgeräteanzahl erfordert.

Beim Out-of-Operation-Laden werden die Geräte erst nach dem nahezu vollständigen Aufbrauchen ihrer Batteriekapazität (vollständig) wieder aufgeladen. Dies kann bei nicht durchgängig betriebenen Terminals bspw. während der Ruhezeiten passieren. Auch hier sind Investitionen in eine entsprechende Ladeinfrastruktur notwendig, die aber ggf. zentriert angelegt werden kann. Wenn mit der Batteriekapazität nicht die vollständige Betriebszeit des Terminals abgedeckt werden kann oder durchgehender Betrieb stattfindet, sind auch hier aufgrund der Ausfallzeiten beim Laden mehr Geräte notwendig als bei der Nutzung dieselbetriebener Geräte.

Im Allgemeinen ist es im Schwerlastbereich bei vollelektrischen Geräten sehr schwer, die benötigte Leistung herzustellen (bspw. RoRo-Zugmaschinen), ohne die Betriebszeit (Entladezyklus) erheblich zu verkürzen (=häufiges Nachladen i. V. m. teils langen Ladezeiten). Das Innovationsfeld im Bereich der vollelektrischen Geräte umfasst dementsprechend v. a. die Ladestrategien und neue Batterietechnologien. Gleichermaßen ist bzgl. des erhöhten Gerätebedarfs aber auch festzuhalten, dass die Geräte im Durchschnitt weniger genutzt und somit länger betrieben werden können (langsamerer Anstieg der Betriebsstunden je Gerät durch hohe Standzeiten - Ladezyklus). Nichtsdestotrotz ist es heute in bestimmten Gerätetypen (bspw. Straddle Carrier) üblich, einmal im Lebenszyklus des Geräts die Batterie zu wechseln.

Für kraftstoffbasierte Antriebskonzepte gilt, dass die volumetrischen und gravimetrischen Energiedichten unabhängig vom Energieträger generell geringer sind als beim Dieselkraftstoff.

Dementsprechend sind smarte Design- und Tanklösungen zu finden, die diese Nachteile kompensieren. Grundsätzlich fallen die Nachteile bei der Betriebszeit bei alternativen Kraftstoffen im Vergleich zu vollelektrischen Lösungen aber geringer aus.

### 3.2.4 Emissionen

Die Bewertung der Emissionen im Vergleich zum konventionellen Dieselantrieb wurde für die eingangs genannten alternativen Antriebstechnologien durchgeführt (siehe auch Kapitel 3). Dafür wurden die Treibhausgasemissionen, lokale Emissionen sowie Lärmemissionen untersucht. Als Referenzwert dienten die durchschnittlichen Emissionen der konventionell angetriebenen Hafenumschlagsgeräte. Basierend auf den durch die Sichtung von Produktdatenblättern und die Befragung der Umschlagbetriebe in den deutschen See- und Binnenhäfen ermittelten Dieselverbräuchen (Liter/Stunde), wurden mithilfe von Emissionsfaktoren aus der Datenbank „GaBi" die Treibhausgasemissionen sowie lokale Emissionen berechnet. Da für die alternativen Antriebstechnologien keine Energieverbrauchsdaten vorlagen, wurde unter Berücksichtigung eines Wirkungsgrads von 35 % **[14]** beim Dieselmotor die verrichtete Arbeit ermittelt, die ebenso als Basis für die alternativen Antriebstechnologien herangezogen wurde.[1]

Bei der Berechnung der Treibhausgasemissionen wurde zwischen den Scopes 1, 2 und 3 unterschieden. Gemäß Greenhouse Gas Protocol berücksichtigt Scope 1 direkte Emissionen, die direkt im Unternehmen, z. B. durch die Verbrennung von Diesel aus Fuhrparkfahrzeugen, entstehen. Scope 2 umfasst indirekte Emissionen, die beim Bezug von Energie, wie hier betrachtet in Form von Elektrizität, entstehen **[19]**. Scope 3 berücksichtigt weitere indirekte Emissionen, die vor- oder nachgelagert entstehen. Bei der Betrachtung der Antriebstechnologien beinhaltet dies beispielsweise die Infrastruktur zur Stromerzeugung oder Erdölgewinnung.

Zur Bewertung der lokalen Emissionen wurde ebenfalls basierend auf den Energieverbräuchen mithilfe von Emissionsfaktoren die Höhe der Emissionen Stickoxide ($NO_X$), Schwefeloxide ($SO_X$) und Feinstaub (PM) bewertet. Da aus gesundheitlichen Gründen insbesondere die direkten Emissionen von Relevanz sind, wurde der Fokus hier auf Scope 1 gelegt.

Zur vergleichenden Bewertung von Lärmemissionen wurde auf Angaben aus dem Automobil- und Flurförderzeug-Bereich zurückgegriffen **[20]**, da für die Anwendung der alternativen Antriebstechnologien in Hafenumschlaggeräten keine quantitativen Lärmemissionsdaten vorlagen. Die Ergebnisse der Bewertung sind der Tabelle 15 zu entnehmen. Das Bewertungsschema orientiert sich an der in Abbildung 11 veranschaulichten Systematik.

[1] Zur Ermittlung des benötigten Energieeinsatzes (Strom, Wasserstoff, E-Fuel) wurden basierend auf verfügbaren Daten im Bereich Pkw weitere Annahmen zur Berechnung herangezogen: 90 % Wirkungsgrad beim voll-elektrischen Antrieb mit Lithium-Ionen-Batterie [15], Bedarf von 9 Liter Wasser / kg Wasserstoff [16], Berücksichtigung des Strombedarfs je kg Wasserstoff [17] zzgl. Strombedarf zur Kompression des Wasserstoffs [45], 50 % Wirkungsgrad beim Antrieb mit Wasserstoff-Brennstoffzelle [18]

| Alternative Antriebs-technologien / Emissions-kategorien | **Verbrennung mit synthetischem Diesel** (E-Fuel) | | **Voll-elektrischer Antrieb mit Lithium-Ionen Batterie** (Nutzung von Ökostrom) | | **Wasserstoff-Brennstoffzelle** (Nutzung von grünem Wasserstoff) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Treibhausgase** | Bewertung | Punktwert | Bewertung | Punktwert | Bewertung | Punktwert |
| Scope 1 | 0 | 30 | ++ | 50* | ++ | 50* |
| Scope 2 | ++ | 50* | ++ | 50* | ++ | 50* |
| Scope 3 | 0 | 30 | ++ | 50 | + | 40 |
| **Lokale Emissionen** $NO_x$, $SO_x$ und PM (Scope 1) | 0 | 30 | ++ | 50* | ++ | 50* |
| **Lärmemissionen** | 0 | 30 | ++ | 50 | ++ | 50 |

**Tabelle 15 | Bewertung von Emissionen alternativer Antriebstechnologien im Vergleich zum Dieselantrieb**

*Es fallen keine Emissionen in diesem Scope an.

### 3.2.5 Nachhaltigkeit

Im Folgenden wird eine Übersicht über weitere Nachhaltigkeitskriterien, die zu den untersuchten Antriebstechnologien verglichen wurden, aufgeführt. Die betrachteten Nachhaltigkeitskriterien, die durch den Auftraggeber NOW GmbH vorgegeben wurden, umfassen Ressourcenverbrauch, gesamtwirtschaftliche Abhängigkeiten, Life-Cycle-Emissionen und andere ethische Aspekte. Die aufgeführten Themen mit Bezug zum Energieträger (z. B. Diesel, Strom, Wasserstoff) wurden farblich von Themen mit Bezug zum Energiespeicher/-umwandler (z. B. Katalysator, Lithium-Ionen-Batterie, Brennstoffzelle) abgegrenzt.

Aufgrund mangelnder Daten für Hafenumschlaggeräte wurde diese Übersicht auf Basis einer nicht vollumfänglichen Literaturrecherche zur Nutzung alternativer Antriebstechnologien im Automobil-Bereich und in anderen Anwendungsgebieten zusammengestellt. Ziel ist es, einen Eindruck der aktuell öffentlich relevanten Themen anzuschneiden. Die Übersicht erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Ordinale Bewertungen lassen sich deshalb aus den Ergebnissen nicht ableiten. Für einen vollumfänglichen wissenschaftlichen Vergleich empfiehlt sich eine Life-Cycle-Betrachtung mit einheitlichen Betrachtungsgrenzen.

| | Diesel | Verbrennung mit synthetischem Diesel (E-fuel) | Voll-elektrischer Antrieb mit Lithium-Ionen Batterie (Nutzung von Ökostrom) | Wasserstoff-Brennstoffzelle (Nutzung von grünem Wasserstoff) |
|---|---|---|---|---|
| **Ressourcenverbrauch** | • **Platingruppenmetalle:** essentiell für Fahrzeugkatalysator zur Abgasaufbereitung (je nach Fahrzeugtyp Platin, Palladium, Rhodium) [41]<br>• **Recycling**: etablierte Recyclingprozesse für Verbrennerantriebe; hohe Recyclingrate von Platin mit ca. 50%. [41]<br>• **Rohöl** zur Herstellung von Diesel; bei Gewinnung durch Fracking: hoher Flächen- und Wasserverbrauch, hoher Ressourcenverbrauch in der Raffinierung [42][43] | • **Platingruppenmetalle:** essentiell für Fahrzeugkatalysator zur Abgasaufbereitung (je nach Fahrzeugtyp Platin, Palladium, Rhodium) [41]<br>• **Recycling**: etablierte Recyclingprozesse für Verbrennerantriebe; hohe Recyclingrate von Platin bei ca. 50%. [41]<br>• **Energieverbrauch**: Hoher Energieverbrauch in der Herstellung und hohe Wirkungsverluste [44]<br>• **Ressourcenverbrauch** zur Herstellung erneuerbarer Energie (z.B. PV-Systeme) [41][42][44] | • **Rohstoffaufwand**: Verbrauch an Lithium, Kobalt, Nickel, Grafit/ Kupfer und seltener Erden [41][42]<br>• **Hoher Wasserverbrauch** vor allem bei Lithiumabbau [15]<br>• **Recycling**: Batterierecycling ist potenziell möglich, derzeit wird Lithium aus ökonomischen Gründen jedoch kaum recycelt [41][42][26]<br>• **Energieverbrauch**: Hoher Wirkungsgrad [15]<br>• **Ressourcenverbrauch** zur Herstellung erneuerbarer Energie (z.B. PV-Systeme) [41][42][44] | • **Rohstoffaufwand:** Verbrauch von Platin und Dysprosium als Seltenerdmetall für die Brennstoffzelle [28][29]<br>• **Recycling:** Hohe Recyclingrate von Platin mit ca. 50% [41] Geringe Recyclingraten für Dysprosium [30]<br>• **Hoher Wasserverbrauch** zur Herstellung von grünem Wasserstoff [16]<br>• **Ressourcenverbrauch** zur Herstellung erneuerbarer Energie (z.B. PV-Systeme) [41][42][44] |
| **Gesamtwirtschaftlich (Abhängigkeit)** | • **Abhängigkeit**: sehr geringe Menge an Rohöl in Deutschland, deshalb hohe Abhängigkeit von Importen aus Russland (ca. 37%), Norwegen (12%), Libyen, Großbritannien, Nigeria und den USA [42] | • **Abhängigkeit**: derzeit geringe Verfügbarkeiten von E-Fuels, während die Klimawirkung stark vom verwendeten Strommix in der Herstellung und dem Energieaufwand zur CO2-Gewinnung abhängt [eigene Berechnung][39] | • **Rohstoffverfügbarkeit** voraussichtlich gegeben, es gab jedoch temporäre Verknappungen und starke Preisschwankungen in der Vergangenheit [41][26]<br>• **Abhängigkeiten** bestehen gegenüber Rohstofflieferanten, z.B. ist China Hauptlieferant von Seltenerdmetallen und 90% der Lithiumförderung findet derzeit in Australien, Chile und Argentinien statt [41][42] | • **Platinförderung:** Monopolartige Stellung durch ca. 70% Förderung von Platin in Südafrika. Zurückgewonnene Platingruppenmetalle aus Autokatalysatoren könnten bei weiterer Elektrifizierung an Bedeutung gewinnen [41]<br>• **Verfügbarkeit:** derzeit über 95% des Wasserstoffs aus fossilen Energieträgern. Herstellung von grünem Wasserstoff zukünftig denkbar in Ländern mit genügend erneuerbarer Energie, z.B. Süd- und Westafrika [41][31] |
| **Gesamtwirtschaftlich (Lifecycle-Emissionen)** | • **Indirekte Emissionen** zur Herstellung des Antriebs geringer im Vergleich zum voll-elektrischen Antrieb mit Lithium-Ionen Batterie [32]<br>• **Indirekte Emissionen in der Vorkette:** Entlüften und Abfackeln von Begleitgas führt zu zusätzlichen THG-Emissionen [42] | • **Indirekte Emissionen** zur Herstellung des Antriebs geringer im Vergleich zum voll-elektrischen Antrieb mit Lithium-Ionen Batterie [32]<br>• **Vorkette**: Aufgrund des hohen Energieaufwands für Umwandlungsprozesse werden Scope-3 Treibhausgas-Emissionen im Vergleich zum fossilen Diesel kaum eingespart [eigene Berechnung] | • **Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen** aus energieintensiven Bergbau- und Fertigungsprozessen insbesondere zur Batterieherstellung [15][40]<br>• Bei Rohstoffabbau können giftige Schadstoffe freisetzt werden, die Boden- und Gewässerkontamination, Verlust von Biodiversität und andere Umweltschäden verursachen können [27][40][43]<br>• **Vorkette**: Bei Nutzung von Ökostrom deutliche Verringerung der Scope-3-Emissionen gegenüber der Verbrennung von Diesel [eigene Berechnung] [44] | • **Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen** erwartbar höher in der Herstellung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen als bei anderen Antrieben [35][36]<br>• **Platinmetalle** erzeugen in der Gewinnung sehr hohe THG-Emissionen [42]<br>• **Vorkette:** Derzeit basiert über 95% der Wasserstoffproduktion auf fossilen Energieträgern. Nutzung erneuerbarer Energie ausschlaggebend für Treibhausgas-Reduktion [41][31] |
| **Weitere ethische Aspekte** | • **Umweltaspekte**: Risiko für Ölverschmutzungen mit Folgen wie Kontaminierung von Wasser, Zerstörung von Ökosystemen und Lebewesen [42]<br>• **Emission** toxischer Substanzen und von Ruß [42]<br>• **Soziale Aspekte:** Gesundheitsrisiken durch Abgase, Rohölförderung zum Teil in Ländern mit geringen Umweltauflagen und hoher Korruption [42] | • **Emissionen**: keine lokalen $SO_x$-Emissionen, jedoch weiterhin Abgabe anderer Luftschadstoffe [eigene Berechnung] | • **Soziale Aspekte:** Nutzungskonflikte beim Wasserverbrauch durch Lithiumabbau in wasserknappen Gebieten [15]<br>• Menschenrechtsrisiken beim Kobaltabbau [26]<br>• Hoher Stromverbrauch kann Stromnetze belasten, andererseits können Batterien dem Stromnetz als Ausgleichsspeicher dienen [33]<br>• **Umweltaspekte**: Gefahr der Wasser- und Bodenverschmutzung bei Rohstoffgewinnung [34] | • **Soziale Aspekte:** Massive soziale Probleme im Platinmetall-Bergbau in Südafrika, gesundheitliche Probleme [42]<br>• Potenzielle Nutzung von Überschussenergie in der Herstellung, jedoch derzeit wenig genutzt [38]<br>• **Umwelt Aspekte:** Wasserverschmutzung, sehr hoher Energieverbrauch, fragile Energieinfrastruktur mit Strom hauptsächlich aus Kohle [42] |

Information zum Energiespeicher / -umwandler
Information zum Energieträger

**Tabelle 16 | Nachhaltigkeitskriterien alternativer Technologien für Hafenumschlaggeräte**

### 3.2.6 Gerätekosten

Die Gerätekosten sind entsprechend der zuvor aufgeführten Analysekriterien zu unterteilen in:

- Anschaffungskosten,
- Betriebskosten,
- M & R-Kosten und
- Secondhand-Marktwert/ Entsorgung/Recyclingkosten.

Genaue Angaben zu den einzelnen Komponenten können aufgrund der begrenzten Marktdurchdringung und der sensiblen Natur der Daten nicht gemacht werden. Aus den Gesprächen mit den Geräteherstellern lässt sich die Tendenz ableiten, dass die Anschaffungskosten sowohl bei batterieelektrischen als auch wasserstoffbetriebenen (Brennstoffzelle) Geräten generell höher sind. Die Angaben variieren geräteabhängig, so kosten vollelektrische Zugmaschinen laut Herstellerangaben näherungsweise doppelt so viel wie dieselbetriebene Geräte. Bei den sonstigen, bereits marktreifen vollelektrischen Hafenumschlaggeräten variiert der Aufpreis im Vergleich zum Diesel-Benchmark dagegen schätzungsweise zwischen 20 % und 50 %. Mitunter wird durch Skaleneffekte eine Annäherung der Preise erwartet.

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten werden für vollelektrische Geräte geringer bewertet als für dieselbetriebene Geräte. Bei Brennstoffzellengeräten ist eine finale abschließende Bewertung kaum möglich, ein kalkulierbares Risiko besteht allerdings durch die neuen technischen Anforderungen bei der Wartung und Instandhaltung (neue Mitarbeiterqualifikationen erforderlich).

Mit Blick auf den Zweitmarkt ist eine Weiternutzung über den theoretischen Lifecycle hinaus grundsätzlich möglich und auch vorgesehen. Die Weiterveräußerung erschwert sich bei den alternativen Technologien durch die unmittelbare Verknüpfung mit entsprechender Lade-/Tankinfrastruktur oder mindestens einer Verfügbarkeit der betreffenden Energieträger.

### 3.2.7 Automatisierungspotenzial

Das Automatisierungspotenzial variiert bei alternativen Technologien für Hafenumschlaggeräte sowohl in Abhängigkeit des Gerätetyps als auch teilweise des eingesetzten Energieträgers. Mitunter haben Gerätehersteller bereits eigene Automatisierungssysteme implementiert, die auch komplexe Systeme mit mehreren (teil-)automatisierten Gerätetypen managen können.

Auf der Geräteseite wird von den untersuchten Typen neben den ohnehin automatisierten AGVs v. a. Straddle Carriern ein hohes Automatisierungspotenzial zugesagt. Im Allgemeinen ist eine Automatisierung insbesondere bei Gerätetypen wahrzunehmen, die vergleichsweise einfach zu rekonstruierende Aufgaben verrichten. Mit Blick auf die Umschlagaktivitäten selbst ist das Automatisierungspotenzial zunächst vom eingesetzten Energieträger zu trennen. Allerdings bietet eine Automatisierung insbesondere bei vollelektrischen Anwendungen Vorteile, da die Ladevorgänge leichter abzubilden sind (bspw. induktives Laden), als bei einer Betankung mit einem flüssigen oder gasförmigen Kraftstoff (u. a. Sicherheitsaspekte). Da bei einer Automatisierung vollelektrischer Geräte (unproduktive) Personalkosten während der langen und häufigen Ladeprozesse vermieden werden können, ist diese mitunter sogar eine Voraussetzung für einen sinnvollen praktischen Einsatz.

### 3.2.8 Benötigte Infrastruktur

Im Bereich der vollelektrischen Anwendungen legen die Gerätehersteller viel Wert auf eine Verwendung möglichst universaler technischer Komponenten. So wird bspw. bei Zugmaschinen der von Elektroautos bekannte CCS2.0 Ladestandard genutzt und ermöglicht das weltweite Laden mit Gleichstrom, sodass keine Inkompatibilitäten entstehen. Im Allgemeinen kommen in Hinblick auf die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Errichtung von Ladeinfrastruktur die gleichen Regularien inkl. Standards und Normen wie im Straßenverkehr zur Geltung (v. a. Nutzfahrzeugbereich, nicht-öffentliche Ladepunkte). Verwiesen werden soll an dieser Stelle auf das Angebot der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur, die bei der Planung, Umsetzung und Förderung unterstützt **[50]**.

Nichtsdestotrotz sind Ladeinfrastrukturkonzepte i. V. m. individueller Gestaltung der Batteriegrößen etc. zumeist höchst individuell gestaltet und erschweren eine Weiterveräußerung bzw. die Einrichtung universal nutzbarer Infrastruktur. Bekannt sind zudem verschiedenste Ladeinfrastrukturkonzepte für vollelektrische Geräte, die von Batteriecontainern als Zwischenspeicher (Erhöhung der Ladeleistung) bis zu automatisierten Batteriewechselstationen bei AGVs reichen.

Wasserstoff, Methanol und Ammoniak werden hingegen wie üblich über Tankstellen bereitgestellt. Hierbei sind sowohl zusätzliche Anforderungen in der Handhabung der Stoffe als auch genehmigungsrechtliche Aspekte (siehe auch Kapitel 3.2.10) zu beachten.

### 3.2.9 Risiken Aufrechterhaltung Regelbetrieb

Die mit dem Einsatz alternativer Antriebe verbundenen Risiken leiten sich im Wesentlichen von den heutigen Anforderungen an den zuverlässigen Betrieb von Hafenumschlaggeräten ab, zu diesen zählen u. a.:

- hohe Laufleistung,
- schnelle Wiederherstellung der Laufleistung (Tanken),
- planmäßige und unkomplizierte Instandsetzung,
- Erreichen bestimmter technischer Parameter und
- sicherer Betrieb.

Bei vollelektrischen Hafenumschlaggeräten sind die Risiken im Regelbetrieb größtenteils auf die Batterie und die mit ihr verbundenen operativen Anpassungen zurückzuführen. Aufgrund der geringen Marktdurchdringung entsprechender Anwendungen kann heute nur auf begrenzte Erfahrungswerte beim Verhalten von Batteriekapazitäten entlang des Lebenszyklus bei Nutzung im Hafenbereich zurückgegriffen werden. Die Validität von Herstellerangaben, die lange Haltbarkeiten versprechen, ist somit bisher schwierig zu überprüfen. Eine Abhängigkeit im Regelbetrieb besteht darüber hinaus von einer funktionierenden Anbindung ans Stromnetz, die nicht in allen Regionen gegeben ist.

Die Risiken beim Einsatz der alternativen Energieträger Wasserstoff, Ammoniak und Methanol liegen zum einen in den fehlenden Erfahrungen i. V. m. der Kraftstoffverfügbarkeit begründet. Darüber hinaus sind in der Wartung und Instandhaltung erwartbar zusätzliche Qualifikationen nötig, typische Komponenten sind bei Brennstoffzellengeräten bspw. die Luftfilter.

### 3.2.10 Sonstige Einstiegshürden

Die Befragung der Gerätehersteller und ausgewählter Umschlagbetriebe ergab keine bekannten regulatorischen Restriktionen beim Einsatz alternativer Energieträger in Hafenumschlaggeräten. Für die Implementierung der nötigen Infrastruktur sind die entsprechenden Genehmigungsschritte zu berücksichtigen. Die NOW GmbH hat für Wasserstofftankstellen einen Genehmigungsleitfaden veröffentlicht **[47]**. Bei der Mitnutzung von Schwerlasttankstellen (abhängig vom Gerätetyp, bspw. für Zugmaschinen grundsätzlich möglich) für alternative Energieträger, die weiteren Unternehmen der Hafenwirtschaft zugänglich sind, kann neben sonstigen (u. a. ökonomischen) Vorteilen der individuelle Genehmigungsaufwand reduziert werden.

## 3.3 Bewertung alternativer Technologien für Hafenumschlaggeräte

### 3.3.1 Auswertung der relevanten Gerätetyp-Antriebs-Kombinationen

Im ersten Teil der Bewertung der alternativen Technologien für Hafenumschlaggeräte sollen die gesammelten Erkenntnisse zu den Analysekriterien in Form von Factsheets für die relevanten Gerätetyp-Antriebs-Kombinationen zusammengetragen werden. Zu den relevanten Gerätetyp-Antriebs-Kombinationen werden gemäß der Analyse der technologischen Reife (siehe auch Kapitel 3.2.1) diejenigen gezählt, die im Status quo bereits am Markt verfügbar sind bzw. einen so hohen technologischen Reifegrad besitzen, dass ihre Eigenschaften belastbar zu bewerten sind. Zu diesen Gerätetypen zählen die folgenden insgesamt 10 Kombinationen:

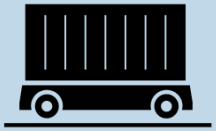
- vollelektrische AGVs,
- wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-AGVs,
- vollelektrische Gabelstapler,
- wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Gabelstapler,
- vollelektrische Hafenmobilkrane,
- vollelektrische Leercontainerstapler,
- vollelektrische Reachstacker,
- vollelektrische Straddle Carrier,
- vollelektrische Zugmaschinen und
- wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Zugmaschinen.

Den übrigen, noch nicht marktreifen Technologien wird einerseits eine hohe Bedeutung für die Erweiterung des heutigen Technologieportfolios auf dem Gebiet der Hafenumschlaggeräte zugeschrieben, andererseits erlaubt der heutige Kenntnisstand keine umfassende Bewertung der Analysekriterien, weshalb auf die Auswertung in Form von Factsheets verzichtet wurde.

Die auf den nachfolgenden Seiten dargestellten Factsheets (siehe Abbildung 15 bis Abbildung 24) besitzen jeweils drei Spalten. In der linken Spalte findet sich die Benennung der Gerätetyp-Antriebs-Kombination sowie der heute verfügbare Leistungsbereich, angegeben in Form eines wesentlichen Leistungsparameters der Geräte, wie z. B. der Tragfähigkeit. In der mittleren Spalte finden sich Key Facts zu den wichtigsten Analysekriterien (laut Gewichtung der Arbeitsgruppe „Alternative Antriebe für Hafenumschlagsgeräte" des Hafennetzwerks e4ports - siehe auch Tabelle 7) des jeweiligen Gerätetyps. In der rechten Spalte sind Netzdiagramme mit den Bewertungen aller Analysekriterien dargestellt. Die Gewichtung der Analysekriterien nimmt dabei angefangen beim oberen mittleren Analysekriterium entlang des Uhrzeigersinns ab. Zudem findet sich in der rechten Spalte eine Einschätzung zur Marktreife und dem potenziellen Markteintritt.

Letztere wurde mit Blick auf die Potenzialanalyse zur Substitution der Bestandsflotte auch für die noch nicht marktreifen Technologien durchgeführt und diente zur Ableitung des geschätzten Markteintritts. Die in den Factsheets angegebenen Zeitpunkte sind als spätester Markteintritt zu betrachten. Die Gerätekosten (Betriebs- und Anschaffungskosten) wurden jeweils für ein Gerät bewertet. Eine durch bspw. kurze Betriebszeiten (Entladezyklus) o. ä. verringerte Produktivität, verbunden mit einem erhöhten Gerätebedarf, wurde an dieser Stelle nicht eingepreist. In den Szenarien der Potenzialanalyse werden auf der Basis von Produktivitätsfaktoren die Infrastruktur- und Flottenanpassungen mitberücksichtigt. Die Produktivitätsfaktoren orientieren sich an Angaben der Hersteller zur Laufzeit der Geräte, es handelt sich um Annahmen, die u. a. in Abhängigkeit der Gegebenheiten der einzelnen Terminals stark abweichen können.

## Factsheet Hafenumschlaggeräte



### Gerätekosten

- höhere CapEx gegenüber Benchmark
- Tendenziell geringere OpEx u. a. durch geringere M&R- und Energiekosten
- Ggf. Vergrößerung Fuhrpark, um hohe Ladezeiten auszugleichen

### Gerätetyp

AGV

### Benötigte Infrastruktur

- Errichtung ggf. mehrerer Ladestationen
- Hohe Anschlussleistung, ggf. Pufferspeicher
- Auch innovative Konzepte mit auto. Batteriewechsel möglich

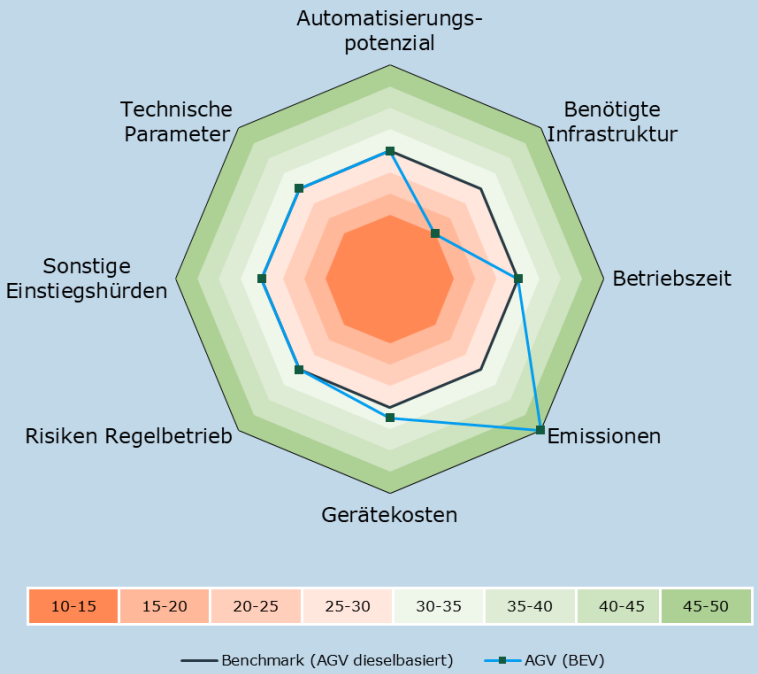
### Antrieb

Vollelektrisch

### Automatisierungspotenzial

- Automatisierung sowohl des Transports als auch der Ladeprozesse
- Bestehende Systeme als Basis für die Automatisierung weiterer Geräte

### Bewertung der Analysekriterien




### Leistungsprofil

Tragfähigkeit: bis zu 70 t

### Betriebszeit

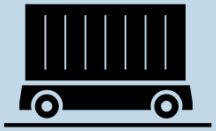
- Geringere Betriebszeit pro vollständiger Aufladung im Vergleich zur Betriebszeit von Dieselgeräten, vollgeladene Batterie reicht aber i. d. R. für 10-12 Stunden Betrieb

### Marktreife (Technology Readiness Level) und -eintritt

- Technology Readiness Level 9
- Marktverfügbarkeit gegeben - Skalierung / Marktdurchdringung ausstehend

**Abbildung 15 | Factsheet vollelektrische AGVs**

## Factsheet Hafenumschlaggeräte



### Gerätekosten

- Sektorübergreifende Tendenzen lassen deutlich höhere CapEx erwarten
- Höhere OpEx (v. a. durch Kraftstoffkosten)
- Unsicherheit bzgl. M&R, Zweitmarkt

### Gerätetyp

AGV

### Benötigte Infrastruktur

- Errichtung einer $H_2$-Tankstelle inkl. Genehmigung und Versorgungskonzept
- Erhöhte CapEx und OpEx für Infrastruktur durch komplexeres Handling von $H_2$

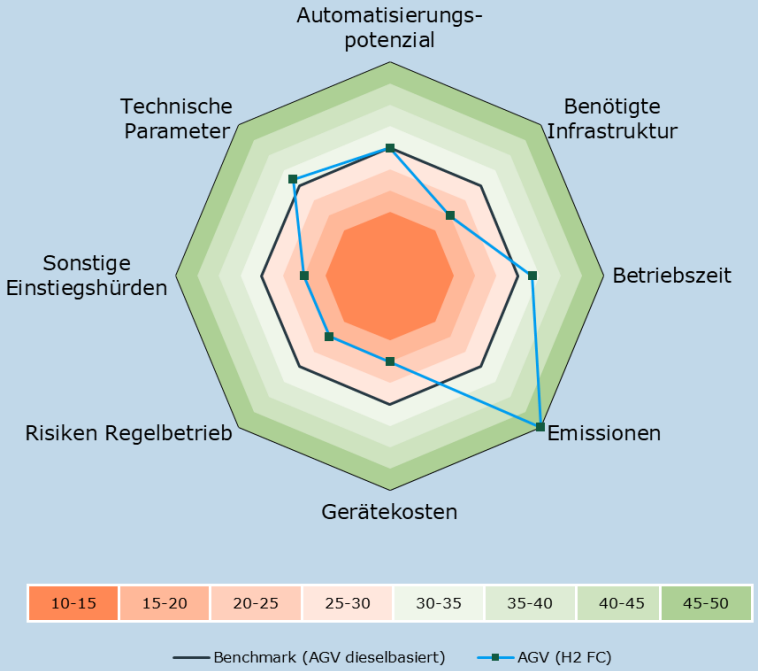
### Antrieb

Wasserstoff-betriebene Brennstoffzelle

### Automatisierungspotenzial

- Automatisierung sowohl des Transports als auch der Ladeprozesse
- Bestehende Systeme als Basis für die Automatisierung weiterer Geräte

### Bewertung der Analysekriterien




### Leistungsprofil

Tragfähigkeit: bis zu 65 t

### Betriebszeit

- Reichweite in Abhängigkeit der Menge mitgeführten Wasserstoffs (geringere Energiedichte als Benchmark)
- Verringerung Betriebszeit nicht erwartbar

### Marktreife (Technology Readiness Level) und -eintritt

- Technology Readiness Level 9
- Marktverfügbarkeit gegeben - Skalierung / Marktdurchdringung ausstehend

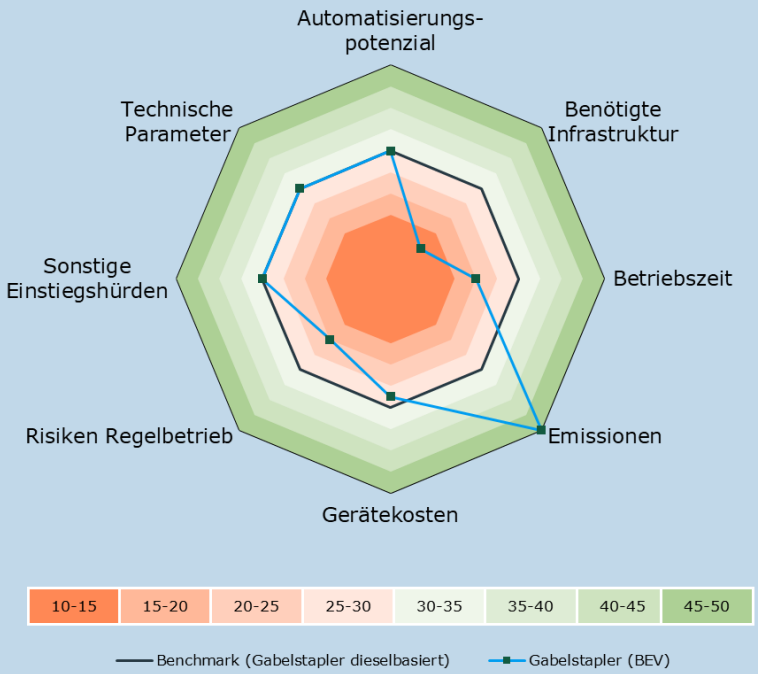
**Abbildung 16 | Factsheet wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-AGVs**

## Factsheet Hafenumschlaggeräte

### Gerätekosten

- Höhere CapEx als Benchmark
- Tendenziell geringere OpEx u. a. durch geringere M&R- sowie Energiekosten

### Bewertung der Analysekriterien




### Gerätetyp

Gabelstapler

### Betriebszeit

- Verringerte Betriebszeit durch häufiges Nachladen und lange Ladezyklen
- Ggf. vergrößerter Fuhrpark, um lange Ladezeiten auszugleichen

### Antrieb

Vollelektrisch

### Technische Parameter

- Vergleichbares technisches Leistungsniveau wie beim Benchmark

### Leistungsprofil

Tragfähigkeit: bis zu 33 t

### Benötigte Infrastruktur

- Errichtung ggf. mehrerer Ladestationen
- Hohe Anschlussleistung und / oder zusätzlicher Pufferspeicher erforderlich

### Marktreife (Technology Readiness Level) und -eintritt

- Technology Readiness Level 9
- Marktverfügbarkeit und -reife gegeben

**Abbildung 17 | Factsheet vollelektrische (Schwerlast-)Gabelstapler**

## Factsheet Hafenumschlaggeräte

### Gerätekosten

- Höhere CapEx als Benchmark
- Höhere OpEx (v. a. durch Kraftstoffkosten sowie M&R)

### Gerätetyp

Gabelstapler

### Betriebszeit

- Reichweite in Abhängigkeit der Menge mitgeführten Wasserstoffs (geringere Energiedichte als Benchmark)
- Ähnliche Betriebszeit wie Benchmark

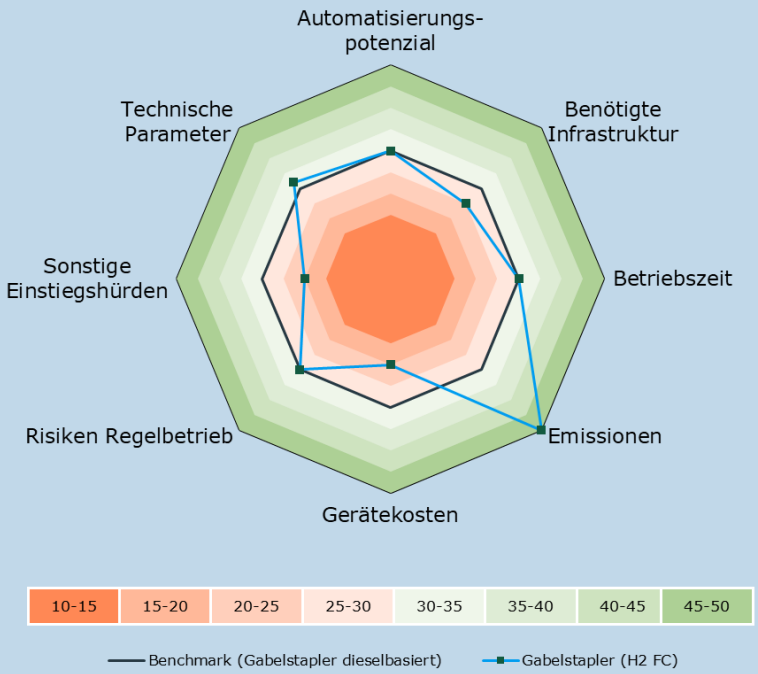
### Antrieb

Wasserstoff-betriebene Brennstoffzelle

### Technische Parameter

- Vergleichbares technisches Leistungsniveau wie beim Benchmark

### Bewertung der Analysekriterien




### Leistungsprofil

Tragfähigkeit: bis zu 18 t

### Benötigte Infrastruktur

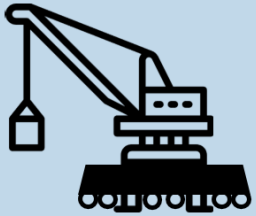
- Errichtung einer $H_2$-Tankstelle inkl. Genehmigung und Versorgungskonzept
- Erhöhte CapEx und OpEx für Infrastruktur durch komplexeres Handling von $H_2$

### Marktreife (Technology Readiness Level) und -eintritt

- Technology Readiness Level 9
- Marktverfügbarkeit und -reife gegeben

**Abbildung 18 | Factsheet wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-(Schwerlast-)Gabelstapler**

## Factsheet Hafenumschlaggeräte



### Gerätekosten

- Etwas höhere CapEx, Erwartung künftiger Preisnachlässe bei Komponenten
- Tendenziell niedrigere OpEx (M&R- und Energiekosten)
- Berücksichtigung der zu errichtenden Infrastruktur (Laden und Netzanschlüsse)

### Gerätetyp

Hafenmobilkrane

### Betriebszeit

- Abhängigkeit des vollelektrischen Betriebs von Netzanschlüssen und der entsprechenden Stromleistung
- Autonomer Betrieb nur bei Positionswechsel

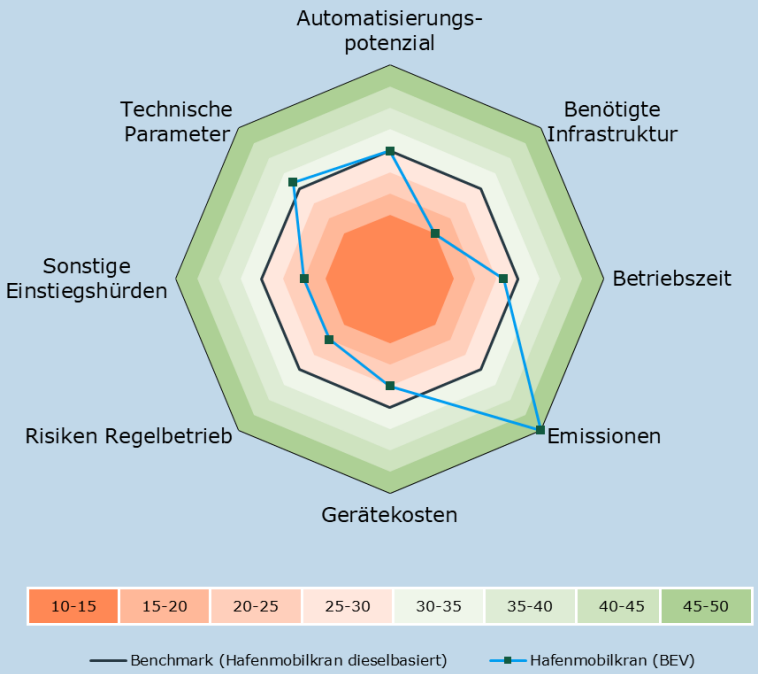
### Antrieb

Vollelektrisch

### Technische Parameter

- Bau unter der Prämisse gleichwertiger Performance im Vergleich zum Benchmark

### Bewertung der Analysekriterien




### Leistungsprofil

Tragfähigkeit: bis 124 Tonnen

### Emissionen

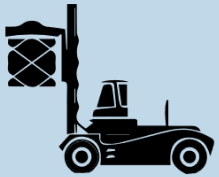
- Keine Emittierung von Treibhausgas- oder Schadstoffemissionen
- Deutliche Reduzierung des Gerätelärms im Vergleich zum Benchmark (Verbrenner)

### Marktreife (Technology Readiness Level) und -eintritt

- Technology Readiness Level 9
- Marktverfügbarkeit gegeben - Skalierung / Marktdurchdringung ausstehend

**Abbildung 19 | Factsheet vollelektrische Hafenmobilkrane**

## Factsheet Hafenumschlaggeräte



### Risiken Regelbetrieb

- Trade-off zwischen Leistungsfähigkeit der Geräte und Betriebszeit (Entladezyklus)
- Fehlende Erfahrungswerte zum Verhalten der Batteriekapazität im Laufe der Zeit

### Gerätetyp

Leercontainerstapler

### Betriebszeit

- Verringerte Betriebszeit durch häufiges Nachladen und lange Ladezyklen
- Ggf. vergrößerter Fuhrpark, um lange Ladezeiten auszugleichen

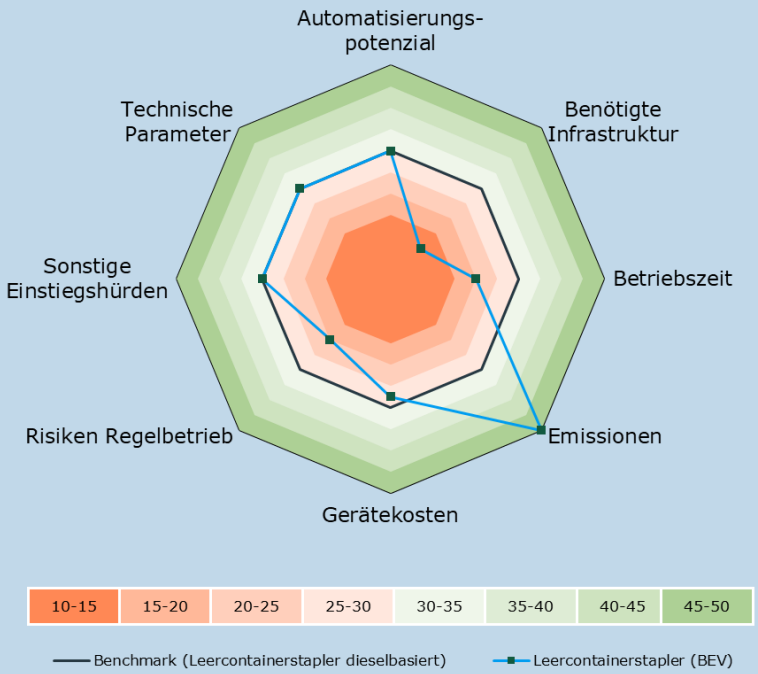
### Antrieb

Vollelektrisch

### Gerätekosten

- höhere CapEx gegenüber Benchmark
- Tendenziell niedrigere OpEx (M&R-Kosten)
- Wiederveräußerungswert kalk. Risiko

### Bewertung der Analysekriterien




### Leistungsprofil

Containerstapelhöhe: bis zu 4 Stück

Tragfähigkeit: bis zu 7 t

### Technische Parameter

- Vergleichbare technische Daten wie Benchmark-Geräte im Leistungsbereich
- Tendenzielle Einschränkungen im oberen Leistungsbereich mit hohem Energiebedarf

### Marktreife (Technology Readiness Level) und -eintritt

- Technology Readiness Level 8-9
- Bisher lediglich ein Gerät am Markt verfügbar (unterer Leistungsbereich)
- Erlangung einer ausgeprägteren Marktverfügbarkeit bis Mitte der 2020er-Jahre

**Abbildung 20 | Factsheet vollelektrische Leercontainerstapler**

## Factsheet Hafenumschlaggeräte

### Gerätekosten

- Ca. 20-50 % höhere CapEx gegenüber Benchmark
- Tendenziell niedrigere OpEx (M&R-Kosten)
- Wiederveräußerungswert kalk. Risiko

### Gerätetyp

Reachstacker

### Betriebszeit

- Verringerte Betriebszeit durch häufiges Nachladen und lange Ladezyklen
- Ggf. vergrößerter Fuhrpark, um lange Ladezeiten auszugleichen

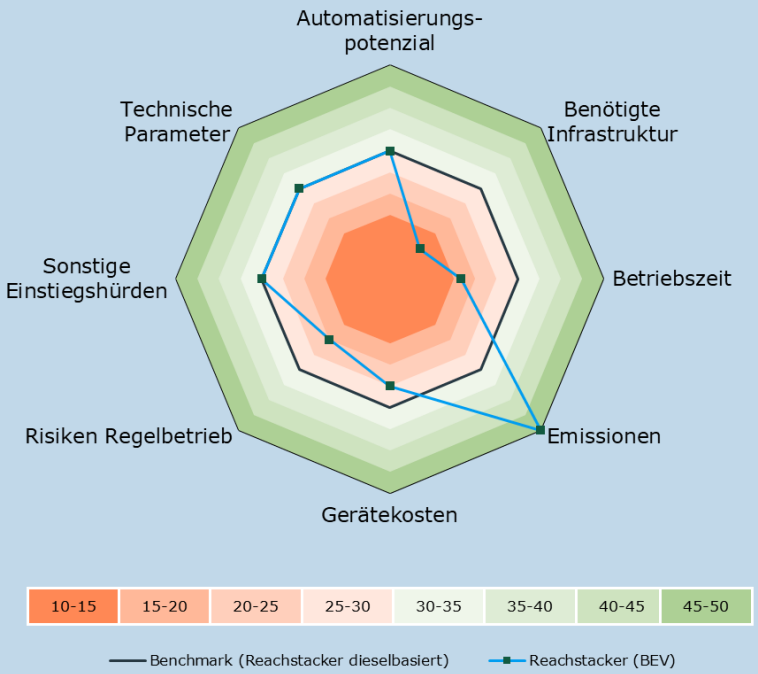
### Antrieb

Vollelektrisch

### Technische Parameter

- Vergleichbare technische Daten wie Benchmark-Geräte im Leistungsbereich
- Tendenzielle Einschränkungen im oberen Leistungsbereich mit hohem Energiebedarf

### Bewertung der Analysekriterien




### Leistungsprofil

Containerstapelhöhe
erste Reihe: bis zu 6 Stück
Reichweite: bis zu 4 Reihen
Tragfähigkeit: bis zu 45 t

### Risiken Regelbetrieb

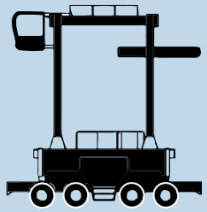
- Trade-off zwischen Leistungsfähigkeit der Geräte und Betriebszeit (Entladezyklus)
- Fehlende Erfahrungswerte zum Verhalten der Batteriekapazität im Laufe der Zeit

### Marktreife (Technology Readiness Level) und -eintritt

- Technology Readiness Level 8-9
- Marktverfügbarkeit gegeben - Skalierung / Marktdurchdringung ausstehend

**Abbildung 21 | Factsheet vollelektrische Reachstacker**

## Factsheet Hafenumschlaggeräte



### Betriebszeit

- Kürzere Betriebszeit mit i. d. R. höheren Standzeiten (in Abhängigkeit der Ladestrategie - z. B. Opportunity Charging)
- Ggf. vergrößerter Fuhrpark, um hohe Ladezeiten auszugleichen

### Gerätetyp

Straddle Carrier

### Risiken Regelbetrieb

- Wahl der (richtigen) Ladestrategie mit starken Auswirkungen auf den Einsatz
- Verträglichkeit mit übrigem Terminalverkehr bei mehr Geräten und Ladeinfrastruktur

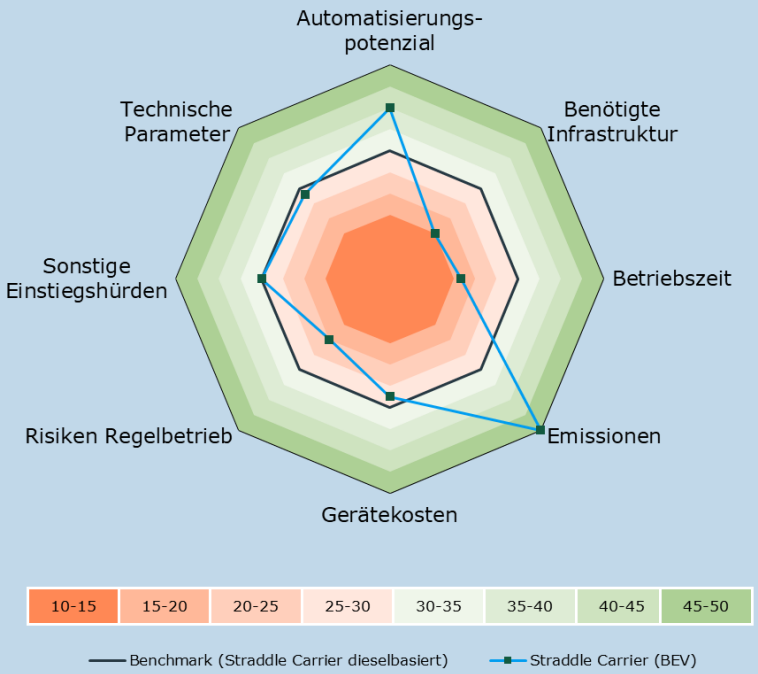
### Antrieb

Vollelektrisch

### Gerätekosten

- Ca. 50 % höhere CapEx gegenüber Benchmark bei erwartbar geringeren OpEx (u. a. Stromkosten und M&R)
- Eingeschränkte Eignung für Zweitmarkt

### Bewertung der Analysekriterien




### Leistungsprofil

Containerstapelhöhe:
bis zu 4 Stück

Tragfähigkeit:
bis zu ca. 60 t

### Automatisierungspotenzial

- Synergien durch vergleichsweise einfache Automatisierung der Ladeprozesse
- Vermeidung übermäßiger Personalkosten durch häufige Ladevorgänge

### Marktreife (Technology Readiness Level) und -eintritt

- Technology Readiness Level 8-9
- Marktverfügbarkeit gegeben - Skalierung / Marktdurchdringung ausstehend

**Abbildung 22 | Factsheet vollelektrische Straddle Carrier**

## Factsheet Hafenumschlaggeräte

## Risiken Regelbetrieb

- Deutliche Verkürzung (ca. 50 %) der Laufzeiten im Schwerlastbereich
- Trade-off zwischen Leistungsfähigkeit der Geräte und Betriebszeit (Entladezyklus)
- Fehlende Erfahrungswerte beim Verhalten der Batteriekapazität nach intensiver Nutzung (Validität Herstellerangaben)

## Gerätetyp

Zugmaschinen

## Emissionen

- Keine Emittierung von Treibhausgas- oder Schadstoffemissionen
- Deutliche Reduzierung des Gerätelärms im Vergleich zum Benchmark (Verbrenner)

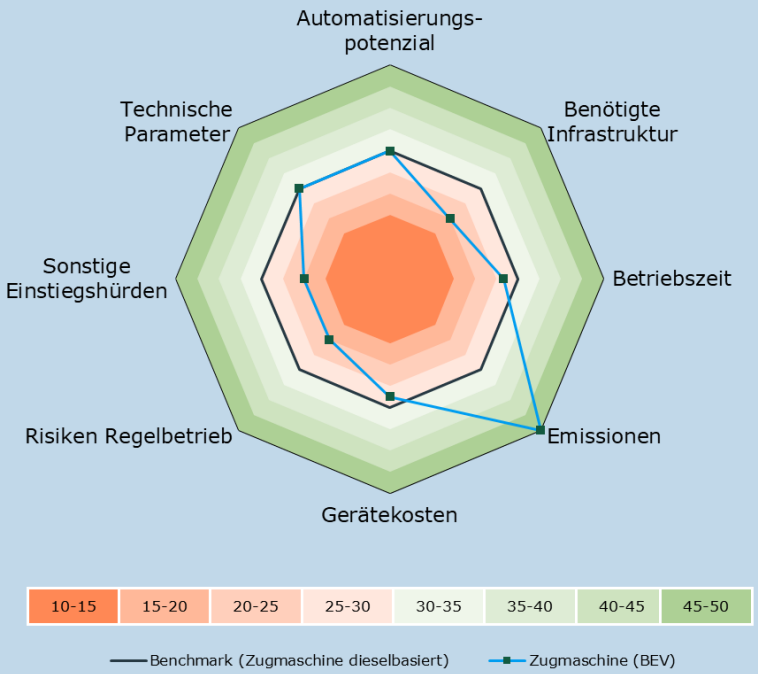
## Antrieb

Vollelektrisch

## Gerätekosten

- höhere CapEx gegenüber Benchmark (etwa doppelte Anschaffungskosten)
- niedrigere OpEx (M&R- und Energiekosten)

## Bewertung der Analysekriterien




## Antriebsformel

4x2

## Sonstige Einstiegshürden

- Fehlende Abdeckung relevanter Leistungsbereiche (z. B. RoRo-Maschinen)
- Notwendigkeit der Errichtung einer Ladeinfrastruktur

## Marktreife (Technology Readiness Level) und -eintritt

- Technology Readiness Level 8-9
- Marktverfügbarkeit gegeben - Skalierung / Marktdurchdringung ausstehend
- Erlangung leistungsbereichübergreifender (bspw. 4x2 und 4x4) Marktreife und -verfügbarkeit in zweiter Hälfte der 2020er-Jahre erwartet

**Abbildung 23 | Factsheet vollelektrische Zugmaschinen**

## Factsheet Hafenumschlaggeräte

### Risiken Regelbetrieb

- Fehlende Erfahrungen zur Kraftstoffverfügbarkeit
- Fehlende Erfahrungen im Regelbetrieb
- Neue Herausforderungen bei M&R

### Gerätetyp

Zugmaschinen

### Emissionen

- Keine Emittierung von Treibhausgas- oder Schadstoffemissionen
- Deutliche Reduzierung des Gerätelärms im Vergleich zum Benchmark (Verbrenner)

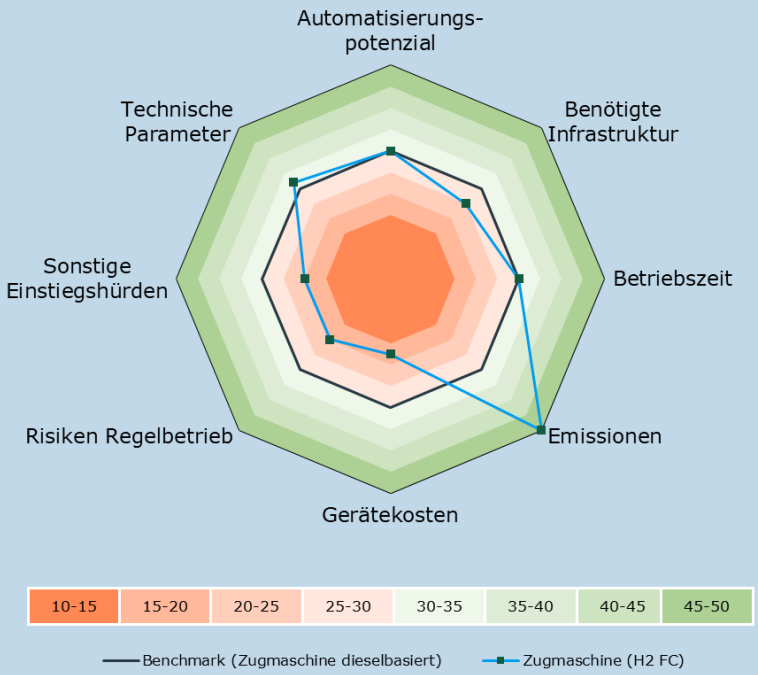
### Antrieb

Wasserstoff-betriebene Brennstoffzelle

### Gerätekosten

- Sektorübergreifende Tendenzen lassen deutlich höhere CapEx erwarten
- Höhere OpEx (v. a. Kraftstoffkosten)
- Unsicherheit bzgl. M&R, Zweitmarkt

### Bewertung der Analysekriterien




### Antriebsformel

4x2

### Sonstige Einstiegshürden

- Keine regulatorischen Restriktionen für $H_2$ in Hafenumschlaggeräten bekannt
- Genehmigungspflicht bei der Errichtung von $H_2$-Tankstellen

### Marktreife (Technology Readiness Level) und -eintritt

- Technology Readiness Level 8
- Erfolgreiche Pilotierung erster Terminal-Zugmaschinen
- Erlangung leistungsbereichübergreifender Marktreife und -verfügbarkeit in zweiter Hälfte der 2020er-Jahre erwartet

**Abbildung 24 | Factsheet wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Zugmaschinen**

### 3.3.2 Ableitung einer Gesamtbewertung für die Potenzialanalyse

Abschließend wurden basierend auf der zu Beginn des Oberkapitels geschilderten Methodik (siehe auch Kapitel 3) die gewichteten Gesamtbewertungen der relevanten Gerätetyp-Antriebs-Kombinationen ermittelt. Hierzu wurden die nicht repräsentative, auf den heutigen Einschätzungen der rückmeldenden Akteure der Arbeitsgruppe „Alternative Antriebe für Hafenumschlagsgeräte" des Hafennetzwerks e4ports basierende Gewichtung der Analysekriterien (siehe auch Tabelle 7) herangezogen. Das Ergebnis ist in Abbildung 25 dargestellt. Zum heutigen Zeitpunkt wird keine der 10 untersuchten alternativen Technologien besser bewertet als der Diesel-Benchmark. Somit bestehen keine ausreichenden Anreize, in entsprechende Geräte zu investieren und damit die Defossilisierung der Hafenwirtschaft voranzutreiben.

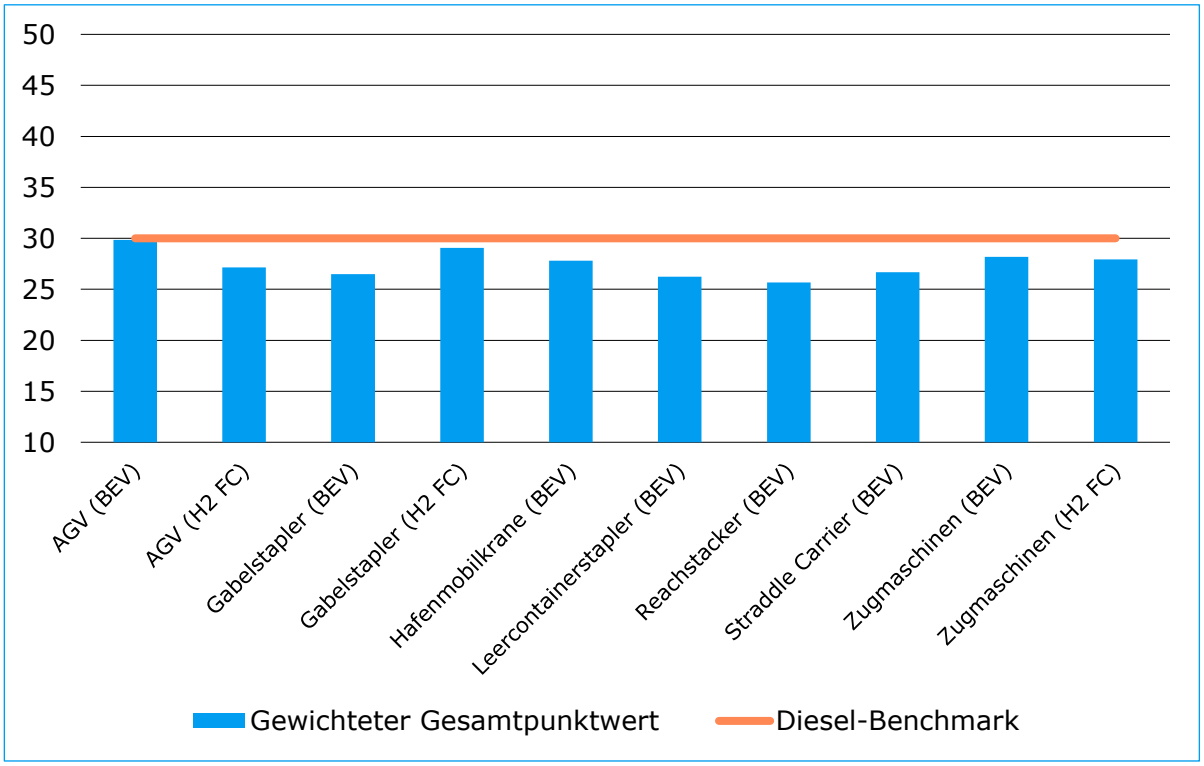



**Abbildung 25 | Gesamtbewertung der Gerätetyp-Antrieb-Kombinationen im Vergleich zum Diesel-Benchmark**

Das Bewertungssystem soll daher abschließend dazu genutzt werden, um zu überprüfen, durch welche Maßnahmen entsprechende Anreize (bessere Gesamtbewertung / bessere Geräte) gesetzt werden können. Konkret sollen mögliche Fördermaßnahmen simuliert werden. Relevant sind neben der Unterstützung bei klassischen CapEx- (z. B. Anschaffungskosten Gerät) und OpEx-Bestandteilen (Kraftstoff- bzw. Energiekosten) entsprechend der Ergebnisse der Analyse v. a. auch die Infrastrukturkosten.

Dementsprechend wurde in einem ersten Versuch der Reihe nach für die Kriterien:

1 | Anschaffungskosten,
2 | Infrastrukturkosten und
3 | Betriebskosten inkl. M&R

eine Parität zum Diesel-Benchmark hergestellt.

Die Ergebnisse des Versuches sind in Abbildung 26 visualisiert. Nach Herstellung aller aufgelisteten Paritäten weisen lediglich 2 von 10 Geräten eine höhere Gesamtbewertung als das Diesel-Benchmark auf.

Daher soll in einem weiteren Versuch ein noch intensiverer Förderansatz simuliert werden, bei dem die entsprechenden alternativen Technologien hinsichtlich der Kostenbestandteile ggb. dem Diesel-Benchmark bevorteilt werden. Dafür wurde in der Gesamtbewertung der Reihe nach für:

1 | die Betriebskosten inkl. M&R,
2 | die Anschaffungskosten und
3 | die Infrastrukturkosten

eine deutlich bessere Bewertung (Punktwert 50) unterstellt. Selbst in diesem Szenario weisen unter Einbezug aller Maßnahmen nicht alle Gerätetyp-Antriebs-Kombinationen eine bessere Bewertung als der Diesel-Benchmark auf (9 von 10).

Zusammenfassend lässt sich zum Abschluss der Analyse festhalten, dass es für eine dynamische Marktdurchdringung alternativer Technologien für Hafenumschlaggeräte Fördermaßnahmen bedarf. Die Geräte sind Stand heute i. d. R. noch nicht vollständig wettbewerbsfähig. Eine alleinige Adressierung von CapEx- und / oder OpEx-Förderung ist allerdings nicht zielführend. Die Forschung und Entwicklung behält eine wichtige Funktion und muss gleichermaßen weiter unterstützt werden, um neue Technologien voranzutreiben und bestehende weiterzuentwickeln.

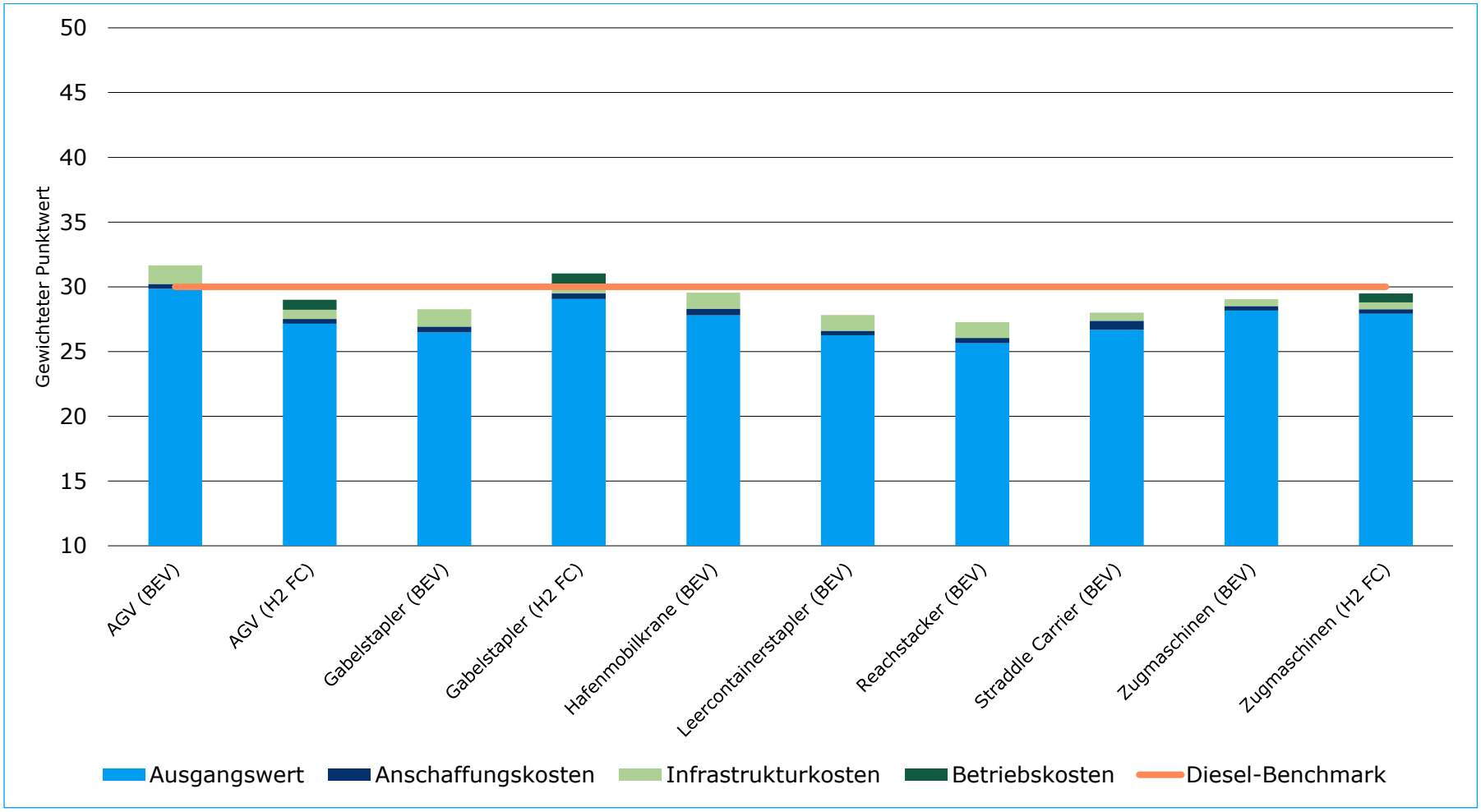



**Abbildung 26 | Veränderung der Gesamtbewertung der Gerätetyp-Antrieb-Kombinationen bei Herstellung einer Kostenparität**

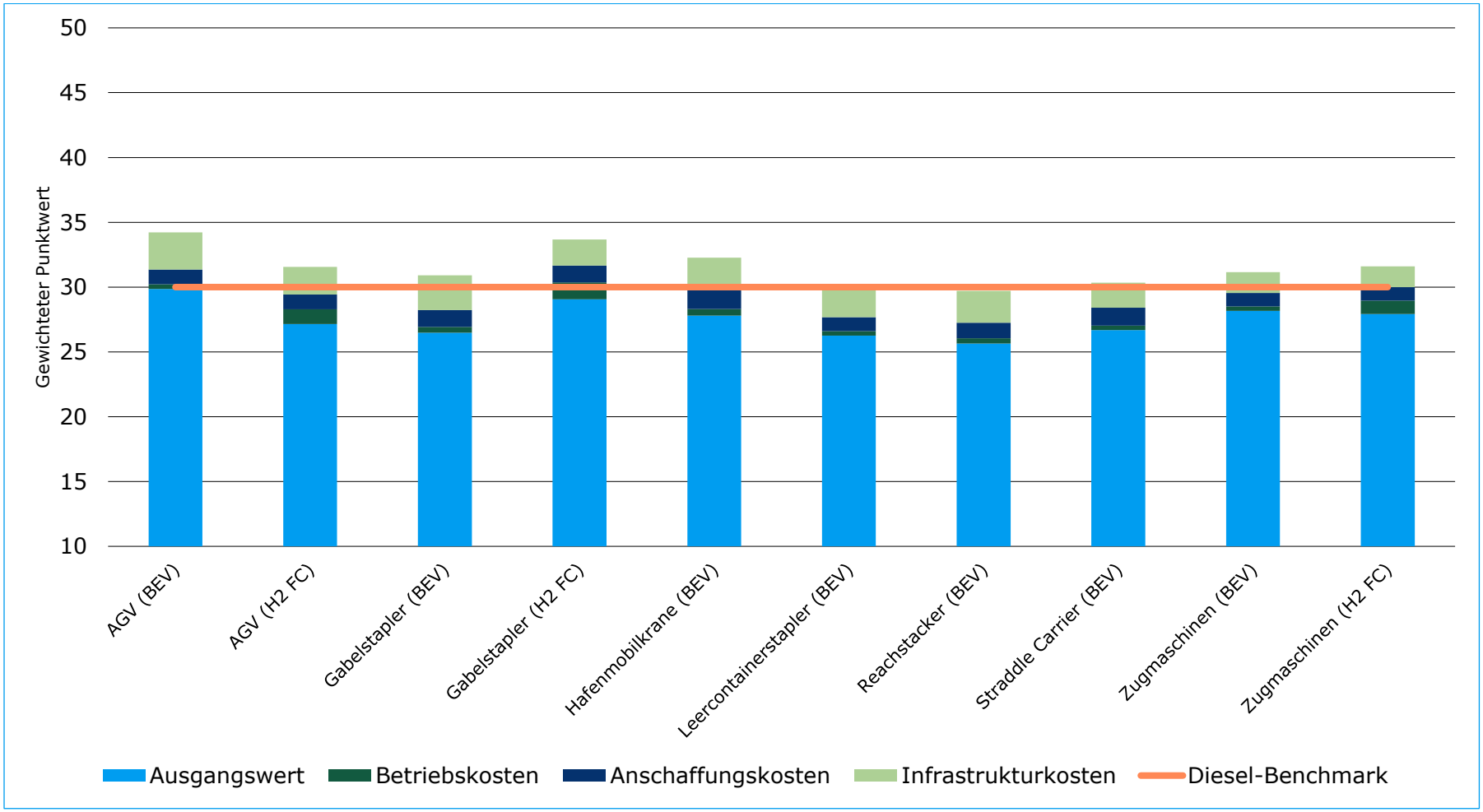



**Abbildung 27 | Veränderung der Gesamtbewertung der Gerätetyp-Antrieb-Kombinationen bei bedeutend besserer Bewertung der Kostenbestandteile alternativer Antriebstechnologien**

# 4. POTENZIALANALYSE ZUR SUBSTITUTION DER GERÄTEFLOTTE DURCH EQUIPMENT MIT ALTERNATIVEN ANTRIEBEN

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln zum einen der Gerätebestand und die Gerätebestandentwicklung sowie die Analyse alternativer Technologien und dessen Bewertung vorgenommen wurde, erfolgt nunmehr die Potenzialanalyse zur Substitution der Geräteflotte durch Equipment mit alternativen Antrieben.

## 4.1 Methodik

Grundsätzlich wird die Gerätebestandsentwicklung als Grundlage für die Substitutionsanalyse hinzugezogen. Diese bietet die Basis, indem die „Soll-Geräte" für die Jahre 2030 und 2040 vorgegeben werden. Während in Kapitel 2.2 der in 2021 verbreitete Antriebsmix zur Fortschreibung des Gerätebestandes hinzugezogen wurde, soll der Fokus in diesem Abschnitt neben der Berücksichtigung von Elektrifizierungs- und Automatisierungsvorhaben auf die Substitution von dieselbetriebenen Geräten durch alternative Antriebe gelegt werden.

Ziel ist es, herauszustellen, welcher Anteil an dieselbetriebenen Geräten in der Flotte bis 2040 durch alternative Antriebs- und Motorenkonzepte potenziell ersetzt werden kann. Dabei ist schließlich herauszustellen, welches Emissionsreduktionspotenzial sich unter Berücksichtigung von Parametern wie z. B. Kraftstoff-/Energieverbrauch, Betriebsstunden und Lebensdauer des jeweiligen Gerätetyps ergibt.

Für die Ableitung des Substitutionspotentials werden verschiedene Szenarien betrachtet

1 | Szenario A: *Business as usual*
2 | Szenario B: *Mit halber Kraft*
3 | Szenario C: *Volle Kraft voraus*

Für die Bewertung werden die Ergebnisse des vorangegangenen Kapitels zu den vielversprechendsten Alternativen und der voraussichtliche Markteintritt alternativer Antriebe für die jeweiligen Gerätetypen ausgewiesen. Die Evaluierung der erwarteten Marktverfügbarkeit basiert auf der fundierten Einschätzung der technologischen Reife (Technology Readiness Level).

Die übergeordnete Methodik basiert auf einem rollierenden System, welches die durchschnittliche Nutzungsdauer bzw. Lebensdauer der Gerätetypen und somit den Austausch über den Betrachtungszeitraum betrachtet. Die hier berücksichtigte Lebensdauer basiert auf zwei Messwerten. Zum einen wurde das gewichtete Mittel der praktischen Nutzungsdauer je Gerätetyp auf Basis der Umfrageergebnisse ermittelt. Zum anderen wurde die theoretische Nutzungsdauer (basierend auf Abschreibungstabelle für allgemein verwendbare Anlagegüter (AfA-Tabelle)) hinzugezogen. Die kombinierte Betrachtung erscheint sinnvoll und zielführend, da zurückliegende Untersuchungen ergeben haben, dass Geräte häufig deutlich über die eigentliche Lebensnutzungsdauererwartung hinaus in Betrieb sind.

Das rollierende System berücksichtigt also einen Austausch der Geräte. In diesem Zusammenhang ist als kritische Modellannahme zu berücksichtigen, dass sich die Genauigkeit der Ergebnisse zwischen 1-4 Jahren liegt. Grund hierfür ist das Altersprofil der Geräte im Status quo, welches über die Umfrage erhoben wurde und die Grundlage für das Modell bildet.

Grundsätzlich besteht die Annahme für eine Substitution, dass die Geräte wettbewerbsfähig sind und eine Kostengleichheit gegenüber den dieselbetriebenen Geräten besteht.

Die Verbindung des Markteintritts der alternativen Geräte und dem rollierenden Austauschsystem ermöglicht schließlich die Ermittlung der Geräteanzahl. In diesem Zusammenhang wird zum einen herausgestellt wie viele Geräte in 2030 und 2040 noch nicht durch Alternativen ersetzt sein werden. Zum anderen wird die Anzahl der substituierenden Geräte ermittelt. Hierbei wird die abweichende Produktivität der alternativen Geräte berücksichtigt.

Das Emissionsreduktionspotenzial bezieht sich auf die direkt verursachten $CO_2$-Emissionen (Scope 1). Aus diesem Grund ist die substituierende Antriebsart für die Berechnung nicht von direkter Relevanz. Die Ermittlung der durch die verbliebenen Geräte verursachte $CO_2$-Emission erfolgt ferner auf bekannte Weise (siehe Kapitel 2.3).

## 4.2 Substitutions-Szenarien & Emissionsreduktionspotenzial

Grundsätzlich werden drei Szenarien betrachtet, welche verschiedene Ausprägungen zur Substitution beinhalten. Anhand dieser Betrachtung wird die Auswirkung von potenziellen Substitutionsvorhaben auf die gesamte $CO_2$-Emission verdeutlicht.

### 4.2.1 Szenario A: Business as usual

Das Szenario A betrachtet die Fortschreibung des Gerätebestandes, ohne tiefgehende Substitutionsvorhaben zu berücksichtigen. Anstelle der Fortschreibung des derzeitigen Antriebsmixes werden hier jedoch bereits bekannte Elektrifizierungs- und Automatisierungsvorhaben in die Berechnungsgrundlage einbezogen. Hierzu wird auf Basis der Umfrageergebnisse mit den Terminalbetreibern Annahmen zur Entwicklung des Bewirtschaftungssystems getroffen.

Im Containersegment existieren bereits alternative Bewirtschaftungssysteme zu der manuellen / konventionellen Van / Straddle Carrier Bewirtschaftung. Als Alternative gilt beispielsweise ein vollautomatisiertes System mit dem Einsatz von ASC im Yard-Bereich und AGV im horizontalen Transport. Entwicklungsvorhaben in den deutschen Seehäfen sind bekannt, jedoch sind die Planungsvorhaben noch nicht auf Detailebene verfügbar. Es wird die plausible Annahme getroffen, welche den teilweisen Wechsel des Bewirtschaftungssystem von einer konventionellen Bewirtschaftung zu einem AGV / ASC-System[2] berücksichtigt.

Auf Basis der Umfrageergebnisse wird angenommen, dass 10 % der konventionellen Bewirtschaftung (Straddle Carrier) ersetzt wird. Dabei wird zusätzlich ein stufenweiser Ausbau von 50 % bis 2030 und 50 % bis 2040 unterstellt. Zudem ist bekannt, dass die AGV mit Dieselantrieb gegen elektrifizierte Geräte substituiert werden. Dieser Antriebsmix, also eine vollständige Elektrifizierung wird auch für die zukünftigen Automatisierungsvorhaben als Grundlage gelegt.

Die Abbildung 28 zeigt die erwartete Emissions-Entwicklung unter Berücksichtigung von bereits geplanten bzw. vorgenommenen Elektrifizierungs- und Automatisierungsvorhaben. Wie bereits erläutert, bezieht sich dies im Rahmen dieser Betrachtung ausschließlich auf die Seehäfen.

[2] AGV/ASC-System: Bewirtschaftung des Containerterminals durch den Einsatz von AGV im horizontalen Transport in Kombination mit Automated Stacking Cranes (ASC) im Yard-Bereich.

In Hinblick auf die erwartete Entwicklung werden durch diese Vorhaben $CO_2$-Emissionen eingespart. Bereits zuvor wurde deutlich, dass ein wesentlicher Anteil der $CO_2$-Emissionen im Status quo auf den Einsatz von dieselbetriebenen Van / Straddle Carriern zurückzuführen ist. Alleine durch die teilweise Substitution durch elektrobetrieben AGV lässt der die gesamte $CO_2$-Emission in den deutschen Seehäfen von 145 Mio. kg um etwa 5 Prozent auf 139 Mio. kg reduzieren.

Im Rahmen dieser Betrachtung ist zu berücksichtigen, dass keine vollständige Substitution der Geräte unterstellt wurde, sondern ein stufenweiser Ausbau angenommen wird. Die Anzahl der eingesetzten Van / Straddle Carrier reduziert sich im Jahr 2040 von 805 auf 765 Stück, wenngleich die Anzahl der AGV von 125 auf 173 steigt. Aufgrund von Produktivitätsunterschieden werden tendenziell 1,2 AGV für einen Straddle Carrier eingesetzt.

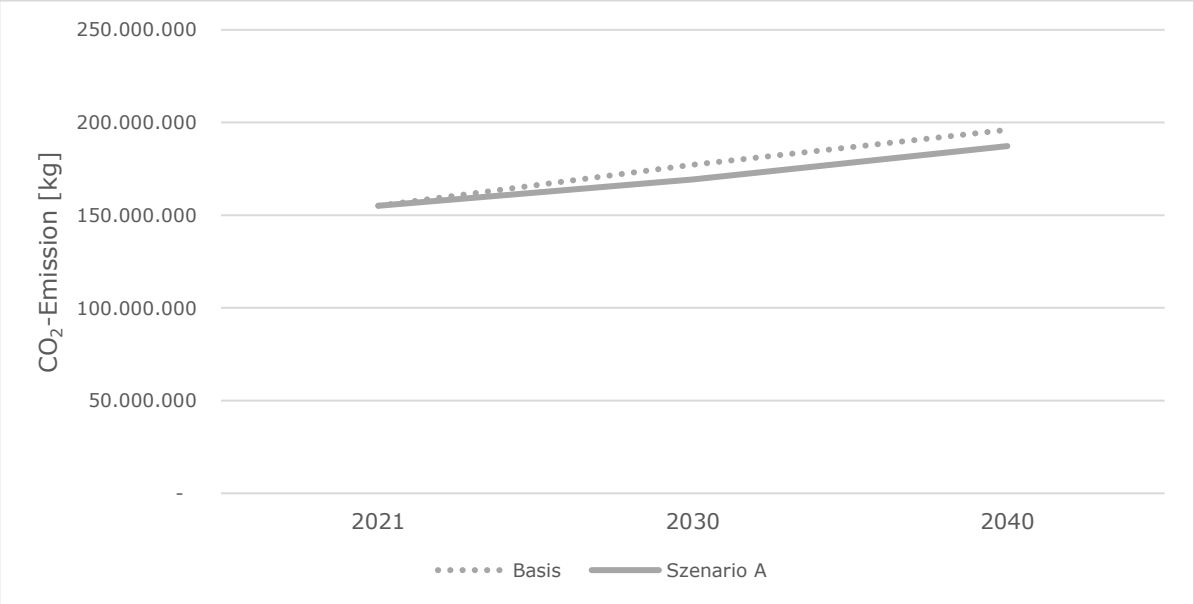



**Abbildung 28 | Szenario A – $CO_2$-Emission auf Basis von Elektrifizierungs- und Automatisierungsvorhaben in deutschen Seehäfen**

In den Binnenhäfen folgt die Bewirtschaftung der Containerterminals i. d. R. einer leicht abweichenden Struktur als in den Seehäfen. Dies ist u. a. auf die Umschlagmenge, Schiffsgrößen sowie Flächenverfügbarkeiten zurückzuführen. Eine in Seehäfen verbreitete Bewirtschaftung durch Portalkrane (RTG, RMG, ASC) ist in Binnenhäfen nicht in identischer Form verbreitet. Grundsätzlich ist eine Automatisierung nicht ausgeschlossen, jedoch ist der Ersatz einer Straddle Carrier Bewirtschaftung durch eine AGV / ASC-Kombination zu diesem Zeitpunkt nicht von Relevanz.

### 4.2.2 Szenario B: Mit halber Kraft

Das Szenario B sieht eine teilweise Substitution der dieselbetriebenen Geräte vor. Dabei wird angenommen, dass sofern ein alternatives Gerät unter bekannten Voraussetzungen wie Wettbewerbsfähigkeit und Kostengleichheit zur Verfügung steht, 50 % der Neuanschaffungen durch alternative Antriebsarten substituiert werden. Die Technologie ist dabei für die Ermittlung der $CO_2$-Einsparung nicht von Relevanz.

Insgesamt steht für alle betrachteten Gerätetypen im Laufe des Betrachtungszeitraums eine Alternative zur Verfügung, weshalb eine Substitution grundsätzlich für jedes Gerät möglich ist und entsprechend auf Basis der Annahmen in Szenario B zu einer $CO_2$-Reduktion führt.

Für Van / Straddle Carrier, Reachstacker, AGV, Stapler und Hafenmobilkrane sind im Status quo bereits Geräte mit alternativen Antrieben auf dem Markt verfügbar. Der Markteintritt für batterie-elektrische Leercontainerstapler oder Terminalzugmaschinen (4x2) wird hingehen auf Ende 2025 datiert, während der Markteintritt für batterie-elektrische Terminalzugmaschinen (4x4) oder wasserstoffbetriebene Zugmaschinen in Hinblick auf die technologische Reife bis Ende 2029 zu erwarten ist.

Trotz der teilweisen noch ausstehenden Marktreife alternativer Geräte, können sowohl in den See- als auch in den Binnenhäfen bis 2040 insgesamt über alle Geräte 50 % der $CO_2$-Emissionen reduziert werden. Insbesondere die batterie-elektrischen Stapler sind bereits im Status quo innerhalb der Geräteflotte verbreitet. Diese Geräte weisen – auch aufgrund der vergleichsweise geringen Nutzungsdauer – bereits im Jahr 2030 eine $CO_2$-Reduktion um 50 % auf.

Reachstacker und Straddle Carrier begünstigen hingehen eine Reduktion um mehr als 40 % bis 2030. Leercontainerstapler und die Zugmaschinen zeigen aufgrund der noch andauernden Marktreife bis 2030 einen geringeren Anteil auf, ermöglichen jedoch eine Substitution der erwarteten $CO_2$-Emission von 2040 um 50 %.

Die Abbildung 29 verdeutlicht die Entwicklung der $CO_2$-Emission über alle Geräte bis 2040 in den deutschen Seehäfen. Das Basis-Szenario zeigt dabei die Entwicklung auf Basis des Antriebsmix im Status quo, während das Szenario A die Elektrifizierungs- und Automatisierungsvorhaben berücksichtigt und als Vergleichswert hinzugezogen wird. Die Abbildung zeigt das Ausmaß des potenziellen Reduktionspotenzials der $CO_2$-Emission bis 2040. Dagegen nochmals der geringe Anteil der Elektrifizierung und Automatisierung visuell herausgestellt.

Insgesamt wird unter den in Szenario B unterstellten Annahmen in den deutschen Seehäfen eine Reduktion der $CO_2$-Emission um 50 % bis 2040 erreicht. Dies entspricht einem Substitutionspotenzial von mehr als 100 Mio. kg $CO_2$.

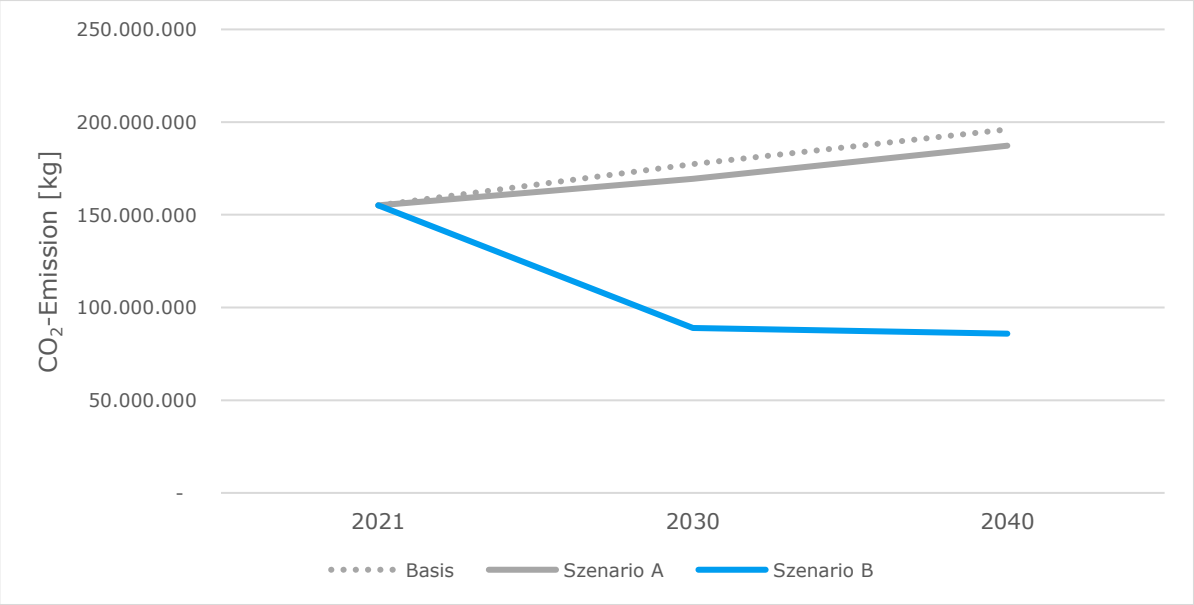



**Abbildung 29 | Szenario B – *Mit halber Kraft* in deutschen Seehäfen**

Während die $CO_2$-Emission im Zuge der Substitutionsvorhaben reduziert wird, erhöht sich die Anzahl der Geräte. Eine Vielzahl der alternativen Geräte weist eine geringere Produktivität als das Diesel-Benchmark auf. Zuvor wurde dies bereits angedeutet – etwa 1,4 batterie-elektrisch betriebene Van / Straddle Carrier sind beispielsweise erforderlich, um die gleiche Produktivität eines dieselbetriebenen Gerätes zu erreichen.

Die Tabelle 17 gibt eine Übersicht über die erwartete Geräteanzahl. In diesem Zusammenhang werden lediglich batterie-elektrisch betriebene Geräte ausgewiesen. Wasserstoff betriebene Geräte weisen teilweise eine abweichende Produktivität auf und sind den Factsheets zu entnehmen.

| Gerätetyp | Leistungsmerkmal | 2030 | | 2040 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Diesel | Alternative (batterie-elektrisch) | Diesel | Alternative (batterie-elektrisch) |
| Van / Straddle Carrier | | 377 | 417 | 382 | 536 |
| AGV | | 0 | 153 | 0 | 173 |
| Reachstacker | | 54 | 60 | 55 | 77 |
| Leercontainerstapler | | 27 | 12 | 21 | 25 |
| Stapler | 6 – 12 t | 243 | 256 | 259 | 292 |
| | > 12 t | 41 | 62 | 56 | 62 |
| Terminal-Zugmaschine | 4x2 | 56 | 20 | 35 | 49 |
| | 4x4 | 305 | 13 | 154 | 216 |
| Hafenmobilkran | <250 kW | 5 | 11 | 4 | 10 |
| | 251-450 kW | 15 | 6 | 10 | 10 |
| | 451-650 kW | 3 | 3 | 2 | 3 |
| | > 650 kW | 20 | 8 | 12 | 13 |

**Tabelle 17 | Szenario B – Gerätebestand nach teilweiser Substitution in den Seehäfen**

Insgesamt wird unter den in Szenario B unterstellten Annahmen in den deutschen Binnenhäfen eine Reduktion der $CO_2$-Emission um mehr als 50 % bis 2040 erreicht. Dies entspricht einem Substitutionspotenzial von mehr als 7 Mio. kg $CO_2$.

Die Abbildung 30 ist bereits bekannt. Das Basisszenario entspricht dem Szenario A, da keine Elektrifizierungs- oder Automatisierungsvorhaben berücksichtigt wurden.

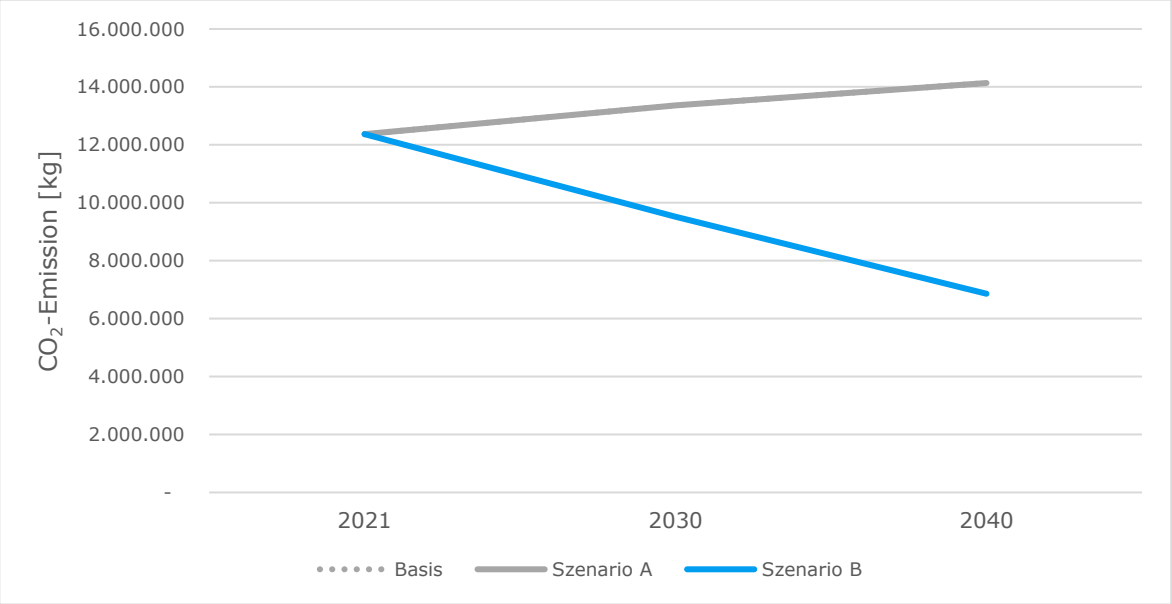



**Abbildung 30 | Szenario B – *Mit halber Kraft* in deutschen Binnenhäfen**

Die Tabelle 18 gibt eine Übersicht über die erwartete Geräteanzahl nach Antrieb für die deutschen Binnenhäfen bis 2040. Es werden lediglich batterie-elektrisch betriebene Geräte ausgewiesen. Wasserstoff betriebene Geräte weisen teilweise eine abweichende Produktivität auf und sind den Factsheets zu entnehmen.

| Gerätetyp | Leistungsmerkmal | 2030 | | 2040 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Diesel | Alternative (batterie-elektrisch) | Diesel | Alternative (batterie-elektrisch) |
| Van / Straddle Carrier | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| AGV | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Reachstacker | | 68 | 41 | 48 | 67 |
| Leercontainerstapler | | 30 | 7 | 20 | 24 |
| Stapler | 6 – 12 t | 4 | 9 | 3 | 7 |
| | > 12 t | 11 | 18 | 8 | 14 |
| Terminal-Zugmaschine | 4x2 | 13 | 3 | 8 | 13 |
| | 4x4 | 9 | 0 | 4 | 7 |
| Hafenmobilkran | <250 kW | 21 | 5 | 9 | 9 |
| | 251-450 kW | 4 | 5 | 4 | 1 |
| | 451-650 kW | 2 | 3 | 2 | 3 |
| | > 650 kW | 4 | 1 | 2 | 3 |

**Tabelle 18 | Szenario B – Gerätebestand nach teilweiser Substitution in den Binnenhäfen**

### 4.2.3 Szenario C: Volle Kraft voraus

Das Szenario C sieht eine vollständige Substitution der dieselbetriebenen Geräte vor. In diesem Zusammenhang wird angenommen, dass 100 % der Neuschaffungen durch alternative Antriebe ausgetauscht werden – auch in diesem Zusammenhang ist die Technologie für die Ermittlung des $CO_2$-Emissionsreduktionspotenzial nicht relevant.

In dem vorangegangenen Szenario B wurde bereits auf die bereits auf dem Markt verfügbaren und die erwarteten Markteintritte eingegangen. Gleiche Betrachtungsweise wird nunmehr auch für dieses Szenario angenommen. Der Unterschied liegt darin, dass das Szenario C ein Best-Case Szenario darstellt unter der Annahme, dass 100 % der Neuanschaffungen durch den Ersatz durch alternative Antriebe erfolgt – sofern eine Technologie zu dem Zeitpunkt verfügbar ist.

In den deutschen See- und Binnenhäfen kann in Hinblick auf die technologische Reife der alternativen Technologien bis zum Jahr 2040 eine vollständige $CO_2$-Reduktion erfolgen. Im Jahr 2040 könnten somit mehr als 200 Mio. kg $CO_2$ (erwartete Emission im Jahr 2040 im Basis-Szenario ohne Substitution) eingespart werden, sofern eine vollständige Substitution der derzeit dieselbetriebenen Geräte erfolgt. Bereits im Jahr 2030 könnte somit eine Einsparung von fast 80 % in den See- und Binnenhäfen erreicht werden. Das entspricht einem $CO_2$-Reduktionspotenzial von mehr als 140 Mio. kg.

Die Abbildung 31 verdeutlicht die Entwicklung der $CO_2$-Emission über alle Geräte bis 2040 in den deutschen Seehäfen. Das Basis-Szenario zeigt dabei die Entwicklung auf Basis des Antriebsmix im Status quo, während das Szenario A die Elektrifizierungs- und Automatisierungsvorhaben berücksichtigt und zusätzlich zum Szenario B als Vergleichswert hinzugezogen wird.

Insgesamt wird unter den in Szenario C unterstellten Annahmen in den deutschen Seehäfen eine Reduktion der $CO_2$-Emission um 100 % bis 2040 erreicht – heißt, dass jedes einzelne Gerät bis zum Jahr 2040 ohne direkte $CO_2$-Emission in den deutschen Seehäfen betrieben werden könnte.

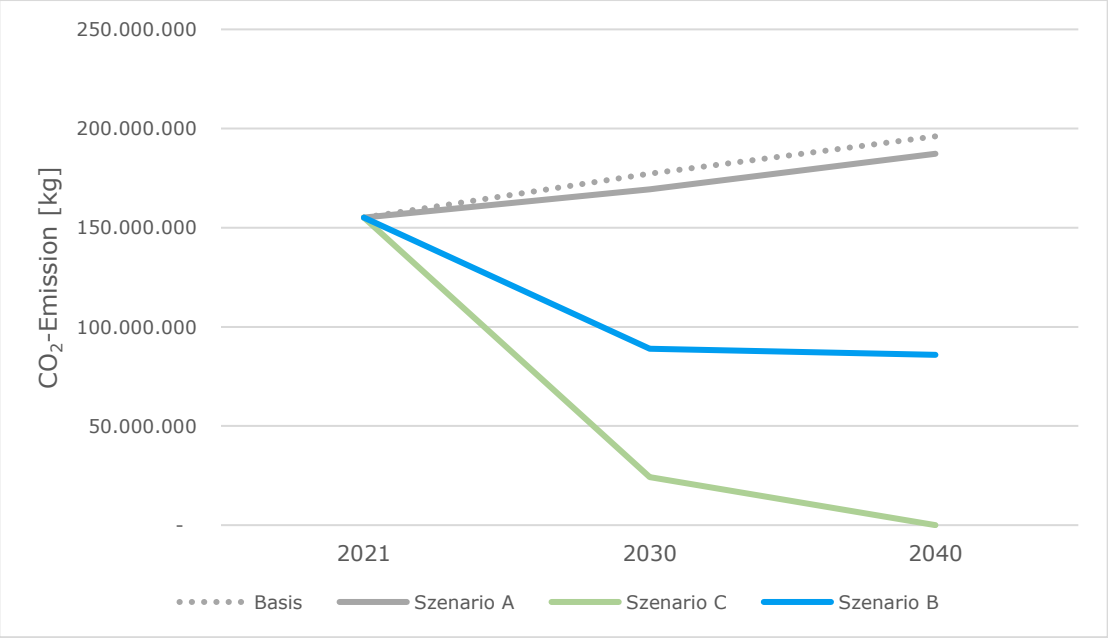



**Abbildung 31 | Szenario C – *Mit voller Kraft* in deutschen Seehäfen**

Unter den bereits bekannten Annahmen zur Produktivität der einzelnen Gerätetypen und deren alternativen Antrieben, werden die Gerätezahlen für die deutschen Seehäfen in der Tabelle 19 ausgewiesen.

| Gerätetyp | Leistungsmerkmal | 2030 | | 2040 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Diesel | Alternative (batterie-elektrisch) | Diesel | Alternative (batterie-elektrisch) |
| Van / Straddle Carrier | | 80 | 833 | 0 | 1071 |
| AGV | | 0 | 153 | 0 | 173 |
| Reachstacker | | 12 | 119 | 0 | 154 |
| Leercontainerstapler | | 17 | 24 | 0 | 50 |
| Stapler | 6 – 12 t | 0 | 486 | 0 | 551 |
| | > 12 t | 0 | 103 | 0 | 118 |
| Terminal-Zugmaschine | 4x2 | 43 | 38 | 0 | 98 |
| | 4x4 | 296 | 25 | 0 | 431 |
| Hafenmobilkran | <250 kW | 1 | 12 | 0 | 12 |
| | 251-450 kW | 10 | 11 | 0 | 20 |
| | 451-650 kW | 1 | 5 | 0 | 5 |
| | > 650 kW | 12 | 16 | 0 | 25 |

**Tabelle 19 | Szenario C – Gerätebestand nach vollständiger Substitution in den Seehäfen**

Für die deutschen Binnenhäfen ergibt sich ein ähnliches Bild wie zuvor für die Seehäfen vorgestellt. Bis zum Jahr 2040 kann bei einer 100 %- Substitution der Geräte eine vollständige Einsparung der $CO_2$-Emission erwartet werden. Bis zum Jahr 2030 würde dies einer Einsparung von 60 % gegenüber dem Szenario A entsprechen. Dies entspricht einer Reduktion um mehr als 8 Mio. kg $CO_2$ bis zum Jahr 2030 und mehr als 14 Mio. kg bis 2040.

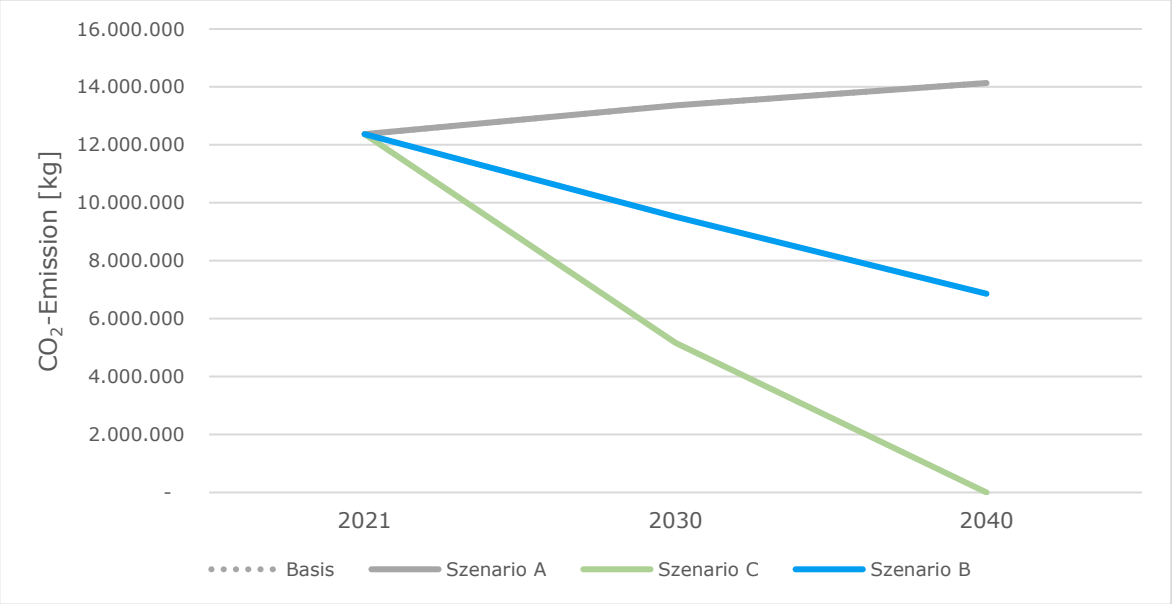



**Abbildung 32 | Szenario C – *Mit voller Kraft* in deutschen Binnenhäfen**

Die Tabelle 20 gibt eine Übersicht über die erwartete Geräteanzahl nach Antrieb für die deutschen Binnenhäfen bis 2040. Wie bereits erläutert, werden lediglich batterie-elektrisch betriebene Geräte ausgewiesen. Wasserstoff betriebene Geräte weisen teilweise eine abweichende Produktivität auf und sind den Factsheets zu entnehmen.

| Gerätetyp | Leistungsmerkmal | 2030 | | 2040 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Diesel | Alternative (batterie-elektrisch) | Diesel | Alternative (batterie-elektrisch) |
| Van / Straddle Carrier | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| AGV | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Reachstacker | | 39 | 81 | 0 | 134 |
| Leercontainerstapler | | 24 | 14 | 0 | 48 |
| Stapler | 6 – 12 t | 0 | 13 | 0 | 10 |
| | > 12 t | 0 | 29 | 0 | 22 |
| Terminal-Zugmaschine | 4x2 | 1 | 6 | 0 | 24 |
| | 4x4 | 9 | 0 | 0 | 13 |
| Hafenmobilkran | <250 kW | 16 | 10 | 0 | 18 |
| | 251-450 kW | 4 | 5 | 0 | 5 |
| | 451-650 kW | 0 | 5 | 0 | 5 |
| | > 650 kW | 4 | 1 | 0 | 5 |

**Tabelle 20 | Szenario C – Gerätebestand nach vollständiger Substitution in den Binnenhäfen**

# 5. ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Die vorangegangenen Analysen haben den Gerätebestand im Status quo und erwartete Entwicklungen herausgestellt sowie die Bewertung alternativer Antriebstechnologien inklusive der Evaluierung der technologischen Reife thematisiert. Darauf basierend erfolgte schließlich die Ermittlung des Substitutionspotenzials dieselbetriebener Geräte und das damit einhergehende $CO_2$-Emissionsreduktionspotenzial bis zum Jahr 2040.

Die Anzahl der Geräte und die Verteilung der Gerätetypen variiert zwischen den See- und Binnenhäfen, was naturgemäß dem Umschlag und den Ladungsarten zuzuschreiben ist. Dabei sind die Seehäfen, gemessen an der Umschlagmenge, stark durch den Container- und RoRo-Umschlag geprägt. Entsprechend sind im Status quo mehr als 40 % der hier berücksichtigten Geräte ausschließlich dem Containerumschlag zuzuschreiben. Dies bezieht sich im Wesentlichen auf den Einsatz von Van / Straddle Carriern und wird zusätzlich durch AGV, Reachstacker und Leecontainerstapler untermauert. Im Jahr 2021 trugen diese Geräte zu fast 80 % zur gesamten $CO_2$-Emission der betrachteten Hafenumschlaggeräte in den deutschen Seehäfen bei.

Im Jahr 2021 wurden durch die betrachteten Hafenumschlaggeräte in den deutschen Seehäfen insgesamt etwa 155 Mio. kg $CO_2$ emittiert. Unter Berücksichtigung der ausgewiesenen Gerätebestandsentwicklung und dem derzeitigen Antriebsmix würde dieser Wert bis 2040 auf mehr als 195 Mio. kg ansteigen.

Der Schüttgut-Umschlag dominiert die Binnenhäfen im Wesentlichen. In Bezug auf die im Rahmen der Studie relevanten Umschlaggeräte, ist der Einfluss jedoch insbesondere auf das Containersegment zu beziehen. Der Einsatz von Reachstackern und Leercontainerstaplern verursacht in den Binnenhäfen fast 70 % der betreffenden $CO_2$-Emission im Jahr 2021. Auf Basis des Gerätebestandes und des ausgewiesenen Antriebsmixes, wurden im Jahr 2021 in den deutschen Binnenhäfen mehr als 12 Mio. kg $CO_2$ emittiert. Bis 2030 wird ist aufgrund der Gerätebestandsentwicklung eine $CO_2$-Emission von mehr als 13 Mio. kg zu erwarten, welche sich ohne Substitutionsvorhaben bis 2040 auf mehr als 14 Mio. kg $CO_2$ ausweiten würde.

Die Analyse alternativer Technologien für Hafenumschlaggeräte hat einen Pool an bereits heute verfügbaren, aber teils noch nicht ausreichend skalierten und marktdurchdringenden Gerätetyp-Antriebs-Kombinationen ergeben. Die exemplarische Bewertung der Technologien unter Einbezug von Eigenrecherche, der Expertise von Geräteherstellern sowie den Erfahrungswerten und Präferenzen von Anwendern ergab, dass alternativ angetriebene Hafenumschlaggeräte heute noch nicht vollständig wettbewerbsfähig mit den bestehenden, dieselbasierten Geräten sind. Eine mögliche Annäherung kann durch entsprechende Fördermaßnahmen erreicht werden. Es wurde nachgewiesen, dass diese sich zum einen neben klassischen CapEx- (z. B. Anschaffungskosten Gerät) und OpEx-Bestandteilen (Kraftstoff- bzw. Energiekosten) auch spezifischen Herausforderungen, wie den Infrastrukturkosten, widmen müssen. Zum anderen kann eine Wettbewerbsfähigkeit nicht allein durch die Angleichung von bzw. Bevorteilung bei Kostenbestandteilen erreicht werden, sondern muss durch die Unterstützung der Forschung und Entwicklung auch auf technischer Ebene vorangebracht werden. Auf Basis der exemplarischen, nicht repräsentativen Bewertung der alternativen Antriebstechnologien wurde anschließend das Potenzial zur Substitution der Bestandsflotte ermittelt.

In den deutschen See- und Binnenhäfen kann in Hinblick auf die technologische Reife der alternativen Technologien bis zum Jahr 2040 potenziell eine vollständige Reduktion des durch die betrachteten Hafenumschlaggeräte emittierten $CO_2$ erfolgen. Im Jahr 2040 könnten 167 Mio. kg $CO_2$ eingespart werden, sofern eine vollständige Substitution der derzeit dieselbetriebenen Geräte erfolgt. Bereits im Jahr 2030 könnte eine Einsparung von fast 80 % in den See- und Binnenhäfen erreicht werden. Das entspricht einem $CO_2$-Reduktionspotenzial von mehr als 140 Mio. kg.

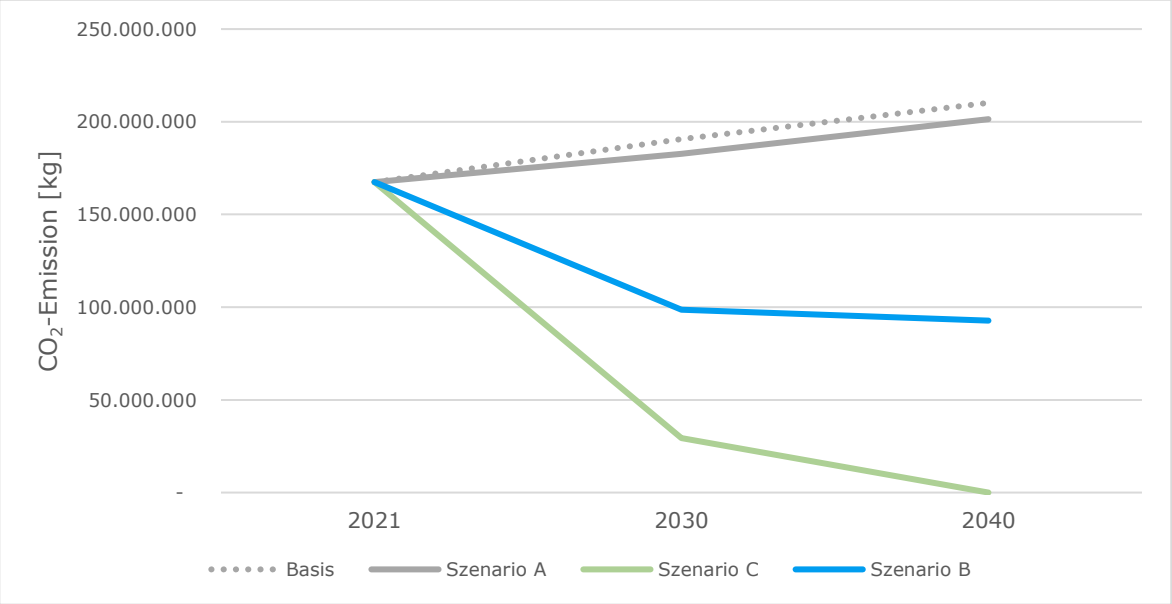



**Abbildung 33 | Emissionsreduktionspotenzial in der Gesamtbetrachtung**

Die Abbildung 33 verdeutlicht die Auswirkungen der Substitutionsszenarien über alle Hafenstandorte in Deutschland. Es wird nochmals betont, dass reine Elektrifizierungs- und Automatisierungsvorhaben in den Großterminals zwar einen sichtbaren Einfluss auf die $CO_2$-Emission zeigen, dieser jedoch im Verhältnis zu umfänglichen Substitutionsvorhaben als fast unbedeutend zu bewerten ist.

Signifikante Änderungen und demnach insbesondere $CO_2$-Einsparungen ergeben sich erst durch gezielte Substitutionsvorhaben dieselbetriebener Geräte. Die technologische Reife alternativer Antriebe ist für ausgewählte Gerätetypen bereits gegeben, weitere Gerätetypen und Leistungsklassen werden erwartbar in den nächsten Jahren erschlossen (siehe auch Kapitel 3.2.1), was aus theoretischer Sicht eine Substitution erlaubt. Elementar für eine Substitution ist jedoch die Wettbewerbsfähigkeit alternativer Antriebe.

Um diese herzustellen, wurden die während der Bearbeitung der Studie gesammelten Lessons Learned und Potenziale für alternativ angetriebene Hafenumschlaggeräte zusammengetragen und werden zum Studienabschluss nachfolgend in Form von Empfehlungen wiedergegeben.

1 | Die technischen Parameter auf bzw. zu dem Umschlagterminal (zur Bestimmung der möglichen Bandbreite bzw. grundsätzlichen Eignung alternativer Antriebtechnologien) müssen frühzeitig überprüft werden, mit u. a.
    a. der Überprüfung der Netzanschlussleistung (gemeinsam mit Netzbetreibern),
    b. einer Analyse des Platzangebotes bzw. der Verortung von potenziell freien / beräumbaren Flächen auf dem Terminal.

2 | Es muss bewusst werden, dass vollelektrische Antriebe (gegenwärtig) nicht für die gesamte Bandbreite der Gerätetypen bzw. Leistungsklassen geeignet sind. Hierbei wirken u. a. Aufbau und Raumangebot der Geräte limitierend.

**Abbildung 34 | Trade-off bei der Eignung vollelektrischer Antriebe für Hafenumschlaggeräte**

3 | Umschlaggeräte mit alternativen Antriebstechnologien besitzen (gegenwärtig) im Allgemeinen höhere Total Costs of Ownership (TCO) als herkömmliche Geräte (meistens nicht nur stückkostenbezogen, sondern auch flottenbezogen). Zur Attraktivitätssteigerung und Erhöhung der Marktdurchdringung (erfolgskritisch für Szenario C) ist eine umfangreiche und flexible TCO-Angleichung nötig, möglich u. a. durch Förderung von

a. Anschaffungskosten,
b. Infrastrukturkosten und
c. Betriebskosten

4 | Zur Abdeckung sämtlicher Gerätetypen und Leistungsklassen mit alternativen Antriebstechnologien bedarf es (flüssiger oder gasförmiger) Kraftstoffe (e- und bio-fuels), die auf gleichem Raum / bei gleichem Gewicht mehr Energie als Batterien speichern.

5 | Es ist erforderlich, schnell eine größere Bandbreite alternativer Antriebstechnologien, nicht nur, aber insbesondere für die Gerätetypen und Leistungsklassen (ggf. gefördert) zu entwickeln, die bisher durch die Hersteller weniger stark fokussiert wurden (z. B. bei Reachstackern und Straddle Carriern).

6 | Ergänzend ist das Schaffen von Reallaboren und Testflächen für Piloten (auch im direkten Vergleich verschiedener Piloten) zu unterstützen, um die Antriebstechnologien unter Realbedingungen erproben zu können und den Zeitpfad bis zur Marktreife zu optimieren (z. B. Innovationscluster Clean Port & Logistics) **[10]**.

7 | Die bei den Genehmigungsbehörden gegenwärtig kaum oder noch nicht einheitlich vorhanden Erfahrungswerte zur Beurteilung von z. B. Betriebstankstellen für e- und bio-fuels oder Ladepunkten bedürfen eines intensiveren horizontalen und vertikalen behördlichen Austausches (z. B. Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik - LASI). Die Genehmigungsanforderungen dürfen nicht zum Showstopper für die Einführung alternativ angetriebener Hafenumschlaggeräte werden.

8 | In Hinblick auf die unterschiedlichen (u. a. betrieblichen) Anforderungen und Voraussetzungen an und für alternativ angetriebene Hafenumschlaggeräte sollte die Beratung zu Dekarbonisierungsalternativen (besonders für kleine und mittlere Betriebe ohne Erfahrungen in der Projektentwicklung) ein möglicher Fördergegenstand sein.

# LITERATUR


**[01]** **Bsp**: Bsp Viewer, Stand Mai 2022.

**[02]** **Eurostat:** Europäische Kommission, Bruttogewicht der nach/aus Haupthafen umgeschlagenen Güter – Deutschland – vierteljährliche Daten [mar_go_qm_de].

**[03]** **Eurostat:** Europäische Kommission, Volumen der beförderten Container nach/aus Haupthäfen – vierteljährliche Daten [mar_go_qm_c_20XX].

**[04]** **Kraftfahrt-Bundesamt:** Fahrzeugzulassungen (FZ) – Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, FZ13, 01. Januar 2022.

**[05]** **Eurostat:** Europäische Kommission, Verkehr nach Ladungsart und Güterart [iww_go_atyca].

**[06]** **Eurostat:** Europäische Kommission, Containerverkehr nach Güterart [iww_go_actygo].

**[07]** **Gaussin:** Vehicles, AGV Performance, 20. Oktober 2022.

**[08]** **H2Ports:** Pilots, Yard Tractor, 20. Oktober 2022.

**[09]** **Terberg:** Terberg hydrogen terminal tractor tested at Antwerp Euroterminal, 5. Juni 2021.

**[10]** **HHLA:** Saubere Lösungen für schwere Lasten, 5. August 2022.

**[11]** **CMB.TECH:** Industry applications, Stand Oktober 2022.

**[12]** **Gaoncell:** Direct methanol fuel cell, Stand Oktober 2022.

**[13]** **Letaq:** Port equipment, Stand Oktober 2022.

**[14]** **Albatayneh, A.; Assaf, M. N.; Alterman, D.; Jaradat, M.:** Environmental and climate technologies, Comparison of the overall energy efficiency for internal combustion engine vehicles and electric vehicles, 2022.

**[15]** **Vezzini, A.:** Elektrofahrzeuge, Mobilität und erneuerbare Energie, 2010.

**[16]** **Zentrum Wasserstoff.Bayern-H2.B:** Wasserstoff-FAQs, 2022.

**[17]** **GaBi Professional:** Datenbank für Emissionsfaktoren und weitere Informationen zur Ökobilanz-Modellierung, 2022.

**[18]** **TÜV Nord:** Wirkungsgrad - Die Nutzbarkeit der Energie, 2022.

**[19]** **World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development:** Greenhouse Gas Protocol, A Corporate Accounting and Reporting Standard, 2004.

**[20]** **Huss, A.; Corneille, M.:** Flurförderzeuge mit Brennstoffzellen, 2012.

[21] **Pokojski, M.:** Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge, Bedeutung für die Elektromobilität, 2019.

[22] **Betz, J.; Buchert, M.; Dolega, P.; Bulach, W.: Öko-Institut e.V.**, Resource consumption of the passenger vehicle sector in Germany until 2035 – the impact of different drive systems, 2021.

[23] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz:** Fracking – Risiken für die Umwelt, 2017.

[24] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz:** Wie umweltfreundlich sind Elektroautos?, 2019.

[25] **Drobe, M.:** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Lithium – Informationen zur Nachhaltigkeit, 2020.

[26] **Castelvecchi, D.:** Nature, Electric cars and batteries: how will the world produce enough?, 2021.

[27] **Kawamoto, R.; Mochizuki, H.; Moriguchi, Y.; Nakano, T.; Motohashi, M.; Sakai, Y.; Inaba, A.:** Sustainability, Estimation of CO2 emissions of internal combustion engine vehicle and battery electric vehicle using LCA, 2019.

[28] **Agert, C.; Brand, U.; Deniz, Ö.; Dyck, A.; Ehrenberger, S.; Gils, H. C.; Zobel, M.:** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende Teil 2: Sektorenkopplung und Wasserstoff: Zwei Seiten der gleichen Medaille, 2020.

[29] **Reuter, B.; Hendrich, A.; Hengstler, J.; Kupferschmid, S.; Schwenk, M.; Knüttgen, I.; Schaloske, M. C.:** e-mobil BW GmbH-Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg, Rohstoffe für innovative Fahrzeugtechnologien: Herausforderungen und Lösungsansätze, 2019.

[30] **M. Buchert und S. Dittrich:** Recycling und Rohstoffe Band 5, Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität, 2012.

[31] **Pohle, J.:** Energietage Journal 2021, Factsheet Wasserstoff, 2021.

[32] **Helms, H.; Biemann, K.; Lambrecht, U.; Jöhrens, J.; Meyer, K:** Klimabilanz von Elektroautos: Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial, 2019.

[33] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz:** Strombedarf und Netze: Ist das Stromnetz fit für die Elektromobilität?, 2020.

[34] **Dolega, P.; Buchert, M.; Betz, J.:** Öko-Institut e.V., Ökologische und sozio-ökonomische Herausforderungen in Batterie-Lieferketten: Graphit und Lithium, 2020.

[35] **International Energy Agency:** The Future of Hydrogen, 2019.

[36] **Pötscher, F.; Winter, R.; Pölz, W.; Lichtblau, G.; Schreiber, H.; Kutschera, U.:** Umweltbundesamt, Ökobilanz alternativer Antriebe – Elektrofahrzeuge im Vergleich, 2014.

[38] **Pagenkopf, J.; Schirmer, T.; Böhm, M.; Streuling, C.; Herwartz, S.:** NOW GmbH, Marktanalyse alternativer Antriebe im deutschen Schienenpersonennahverkehr, 2020.

[39] **Ueckerdt, F.; Bauer, C.; Dirnaichner, A.; Everall, J.; Sacchi, R.; Luderer, G.:** Nature Climate Change, Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation, 2021.

[40] **Melin, H. E.:** Circular Energy Storage-Research and Consulting, Analysis of the climate impact of lithium-ion batteries and how to measure it, 2019.

[41] **Wang, P.; Zhu, Y.; Liu, J.; Yu, P.; Huang, L.:** Energy Reports, Is the secondary consumption of renewable energy sustainable? Empirical evidence from the photovoltaic industry in China, 2022.

[42] **Tan, J.; Jia, S.; Ramakrishna, S.:** Energies, End-of-life photovoltaic modules, 2022.

[43] **Jiang, S.; Zhang, L.; Li, F.; Hua, H.; Liu, X.; Yuan, Z.; Wu, H.:** Journal of environmental management, Environmental impacts of lithium production showing the importance of primary data of upstream process in life-cycle assessment, 2020.

[44] **Verma, S.; Paul, A. R.; Haque, N.:** Minerals, Assessment of Materials and Rare Earth Metals Demand for Sustainable Wind Energy Growth in India, 2022.

[45] **Bossel, U.:** TATuP-Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis, Wasserstoff löst keine Energieprobleme, 2006.

[46] **Projektträger Jülich:** Definition des technologischen Reifegrades, Stand 2022.

[47] **NOW GmbH:** Genehmigungsleitfaden für Wasserstofftankstellen, 2022.

[48] **Berliner Hafen- und Lagerhausgesellschaft mbH:** DNK-Erklärung 2020, Stand 2020

[49] **HHLA:** Geschäftsbericht 2021, Stand 2021.

[50] **Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur:** Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, Stand 2022.

Beauftragt durch:

Bundesministerium für Digitales und Verkehr

Vergabe und Projektbegleitung durch:

NOW-GMBH.DE

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich