

Zero Emission Terminal Tractor

Bericht 163610

Institut für Kraftfahrzeuge
Energiemanagement & Antriebe

Abschlussbericht
Zero Emission Terminal Tractor

Projektnummer

163610

Auftraggeber

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)

Projektleiter*in:

Markus Gerigk M.Sc.

**Markus
Gerigk**

Digital signiert von Markus Gerigk
DN: C=DE, O=RWTH Aachen,
OU=Institut fuer Kraftfahrzeuge,
CN=Markus Gerigk
Grund: Ich genehmige dieses Dokument
Ort: Aachen
Datum: 2021.09.16 14:02:03+02'00'
Foxit Reader Version: 10.1.4

Projektingenieur*in:

Timm Martens M.Sc.

Niklas Drope M.Sc.

Damian Backes M.Sc.

FBL

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced and/or published without the previous written consent of Institute for Automotive Engineering (ika).

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein

Institutsleiter

Aachen, September 2021

Institutsleitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. L. Eckstein

Telefon: +49 241 80 25601 · Fax: +49 241 80 22147

E-Mail: office@ika.rwth-aachen.de · Internet: <http://www.ika.rwth-aachen.de>

Institut für Kraftfahrzeuge · RWTH Aachen University · Steinbachstraße 7 · 52074 Aachen

Inhalt

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | Kurzdarstellungen..... | 4 |
| 1.1 | Aufgabenstellung..... | 4 |
| 1.2 | Voraussetzungen..... | 5 |
| 1.3 | Planung und Ablauf des Vorhabens..... | 5 |
| 1.4 | Wissenschaftlicher und technischer Stand..... | 5 |
| 1.5 | Zusammenarbeit mit anderen Stellen | 5 |
| 2 | Eingehende Darstellungen | 6 |
| 2.1 | Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse | 6 |
| 2.1.1 | Arbeitspaket 1.1 – Betriebs- und Ladestrategien | 6 |
| 2.1.1.1 | Anforderungsdefinition für die Simulationsumgebung..... | 6 |
| 2.1.1.2 | Erstellung des Referenzzyklus CTA-TT..... | 6 |
| 2.1.1.3 | Referenzzyklus DCH-TT | 10 |
| 2.1.1.4 | Betrachtete Betriebs- und Ladestrategien | 11 |
| 2.1.1.5 | Zusammenfassung..... | 11 |
| 2.1.2 | Arbeitspaket 1.2 – Technisch-wirtschaftliche Betrachtung..... | 12 |
| 2.1.2.1 | Zielsetzung und Fragestellungen | 12 |
| 2.1.2.2 | Aufbau des TCO-Modells | 12 |
| 2.1.2.3 | Treibstoff- und Energiekosten | 13 |
| 2.1.2.4 | Weitere Kostenpositionen | 14 |
| 2.1.2.5 | Ermittlung und Bewertung der Fahrzeug- und Flotten-TCO..... | 15 |
| 2.1.3 | Arbeitspaket 1.3 – Anwendungsfälle | 17 |
| 2.1.4 | Arbeitspaket 3.1 – Batterie | 18 |
| 2.1.4.1 | Instrumentierung | 19 |
| 2.1.4.2 | Batteriecharakterisierung | 20 |
| 2.1.4.3 | Konstantstrommessung..... | 20 |
| 2.1.4.4 | Pulse Testing (HPPC) | 22 |
| 2.1.4.5 | Zyklustesting | 24 |
| 2.1.4.6 | CTA-Zyklus | 24 |
| 2.1.4.7 | Anderen Anwendungsfälle | 24 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.1.5 | Arbeitspaket 4.1 – Simulation Fahrzeug | 25 |
| 2.1.5.1 | Erstellung der Triebstrangmodelle | 25 |
| 2.1.5.2 | Anwendungsfall Terminal Tractor | 26 |
| 2.1.5.3 | Parametrierung des Modells | 27 |
| 2.1.5.4 | Validierung des Modells | 28 |
| 2.1.5.5 | Anwendungsfall Automated Guided Vehicle | 29 |
| 2.1.5.6 | Zusammenfassung | 31 |
| 2.1.6 | Arbeitspaket 4.2 – Simulation Ladevorgang | 31 |
| 2.1.6.1 | Aufbau der Umfeldsimulationsumgebungen | 31 |
| 2.1.6.2 | CTA-TT | 32 |
| 2.1.6.3 | DCH-TT | 34 |
| 2.1.6.4 | CTA-AGV | 35 |
| 2.1.6.5 | Flotten- und Logistiksimulation | 36 |
| 2.1.6.6 | Zusammenfassung | 38 |
| 2.2 | Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises | 38 |
| 2.3 | Notwendigkeit und Angemessenheit | 39 |
| 2.4 | Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse | 40 |
| 2.5 | Bekannt gewordener Fortschritt anderer Stellen | 41 |
| 2.6 | Geplante Veröffentlichung der Ergebnisse | 41 |
| 3 | Literaturverzeichnis | 42 |

1 Kurzdarstellungen

1.1 Aufgabenstellung

Das Institut für Kraftfahrzeuge (ika) ist inhaltlich im Rahmen des Arbeitspakets 1.1 daran beteiligt, die zu betrachtenden Anwendungsfälle (Container Terminal Altenwerder – Terminal Tractor (CTA-TT), Düsseldorfer Container Hafen – Terminal Tractor (DCH-TT) sowie CTA – Automated Guided Vehicle (CTA-AGV)) zu analysieren und basierend auf dieser Analyse in den im weiteren Projektverlauf durchzuführenden Simulationen abzubildende Elemente abzuleiten. Weiterhin werden hier anhand der in den Arbeitspaketen 4.1 und 4.2 aufgebauten Simulationsumgebungen Untersuchungen zu unterschiedlichen Betriebs- und Ladestrategien durchgeführt. Basierend auf den hier aufzubauenden Referenzzyklen werden grundlegende Empfehlungen an Hersteller und Anwender der Fahrzeuge mit Hinblick auf die Komponentendimensionierung ermöglicht.

Im Arbeitspaket 1.2 wird in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern ein TCO-Modell eines Terminal Tractors aufgebaut. Hier wird auf Grundlage der zur Verfügung gestellten Komponentendaten der direkte Vergleich von konventionell betriebenen sowie batterieelektrischen Fahrzeugen ermöglicht. Die Identifikation von Optimierungspotenzial mit Hinblick auf die Durchführung von Feldtests sowie den hierfür notwendigen Messpunkten im Fahrzeug wird im Arbeitspaket 1.3 durchgeführt.

Basierend auf den Simulationsergebnissen bzw. Berechnungen der in Arbeitspakete 1.1, 4.1 und 4.2 werden im AP 3.1 Anforderungen an das Batteriesystem bzw. die einzelnen Batteriemodule gestellt. Weiterhin werden Tests an dem durch BMZ aufgebauten Batteriemodul durch das ika Tests auf dem Prüfstand durchgeführt. Zu diesen Tests zählt eine eingehende Modulcharakterisierung sowie Leistungstests auf Basis des erstellten Referenzzyklus und den durch Konecranes zur Verfügung gestellten Leistungsprofilen anderer elektrifizierter Fahrzeuge, welche in deutschen Häfen zum Einsatz kommen.

Das Rückgrat sämtlicher durchgeführter Simulationen sowie Berechnungen stellt das in Arbeitspaket 4.1 zu erstellende Simulationsmodell des Fahrzeugs dar. Hierzu wird ein detailliertes Modell basierend auf zur Verfügung gestellten Komponentendaten erstellt und anhand von Messdaten validiert. Ebenfalls werden in diesem Modell sämtliche relevante Schnittstellen zur den restlichen Umgebungen vorgesehen.

Zur Abbildung und energetischen sowie wirtschaftlichen Bewertung der Gesamtflotte wird im Arbeitspaket 4.2 eine Umfeldsimulationsumgebung aufgebaut, die diese Analyse ermöglicht. Hier werden die Ergebnisse aller im Vorfeld durchgeführten Teilsimulationen zusammengeführt. Weiterhin werden die Abläufe in die spezifischen Anwendungsfälle abgebildet, was einen detaillierten Einblick in die Auswirkung der Komponentendimensionierung auf den Betriebsablauf ermöglicht. Weiterhin können aufgrund dieser Ergebnisse weitere Empfehlungen an die Betreiber mit Hinsicht auf die Flottendimensionierung gegeben werden.

1.2 Voraussetzungen

Das Projekt „Zero Emission Terminal Tractor“ (ZETT) wird im Rahmen des Förderprogramms „Innovative Hafentechnologien“ (IHATEC) durchgeführt. Die Konsortial- sowie Gesamtprojektleitung obliegt Konecranes.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Konsortial- sowie Gesamtprojektleitung wird durch Konecranes gestellt. Diesen obliegt die Gesamtkoordination des Projektes. Die Detailbearbeitung der einzelnen Arbeitspakete wird durch den ika-seitigen Teilprojektleiter koordiniert.

Aufgrund des vorzeitigen Ausstiegs der Firma Konecranes aus dem Projekt wird eine Änderung des Arbeitsplans erforderlich. Hier entfallen ika-seitig Arbeitsinhalte von geringem Umfang. Hinzu kommen durch diese Änderung Batterietests am durch BMZ aufgebauten Batteriemodul, sodass der Gesamtumfang des Projekts für das ika identisch bleibt.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Für das Projekt steht die Simulationsbibliothek des Instituts für Kraftfahrzeuge zur Verfügung. Hierin sind verschiedene Triebstrangsimulationsmodelle generischer Fahrzeugtopologien sowie diverse Komponentendaten vorhanden. Weiterhin können aus den abgeschlossenen Projekten „Batterie-elektrischer Terminal im Feldversuch“ (2018, gefördert durch das BMBF) und „Forschung und Entwicklung batteriebetriebener Schwerlastfahrzeuge (AGV) und Erprobung in einem Feldversuch im Container-Terminal Altenwerder in Hamburg – B-AGV“ (2011, gefördert durch das BMU) Methoden sowie Daten aus bestehenden Simulationen weiterverwendet werden.

Für die verwendete Fachliteratur sei an dieser Stelle auf das Literaturverzeichnis verwiesen. Die Bezugsquelle dieser Literatur stellen entweder kostenfreie öffentliche Quellen oder die an der RWTH Aachen zur Verfügung stehenden Dienste dar.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der geplanten Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern sowie den assoziierten Partnern hat keine weitere Zusammenarbeit mit externen Stellen stattgefunden.

2 Eingehende Darstellungen

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

2.1.1 Arbeitspaket 1.1 – Betriebs- und Ladestrategien

2.1.1.1 Anforderungsdefinition für die Simulationsumgebung

Zielsetzung dieses Arbeitspakets ist zunächst die Definition von Anforderungen an die im Projekt zu erstellenden Simulationsumgebungen. Hierzu wird zunächst gemeinsam mit den Hafenbetreibern eine eingehende Analyse des Anwendungsfalls durchgeführt. Aus Betreibersicht ergeben sich im Wesentlichen zwei Anforderungen: der Betriebsablauf darf durch die mit der Elektrifizierung einer Flotte einhergehenden Einschränkungen nicht gestört werden. Die Transportaufgabe muss weiterhin in vollem Umfang auszuführen sein. Weiterhin muss die ausgearbeitete Lösung so kostengünstig wie möglich sein. Daraus leiten sich die folgenden fünf Fragestellungen ab:

- Wie viele elektrifizierte Fahrzeuge müssen im Vergleich zur konventionell betriebenen Flotte eingesetzt werden, um den Betrieb aufrecht zu erhalten?
- Wie groß muss der Energiespeicher der Fahrzeuge sein?
- Wo soll die Ladetechnik der Fahrzeuge positioniert werden?
- Wie viele Ladepunkte müssen vorgesehen werden?
- Welche Leistung muss von den jeweiligen Ladepunkten gestellt werden?

Diese Anforderungen lassen sich direkt in in der Simulation abzubildende Elemente übersetzen: Die Anzahl der Fahrzeuge sowie die energetische Kapazität deren Energiespeicher muss parametrierbar und variabel dargestellt werden. Weiterhin muss die Anzahl so wie die Leistungsfähigkeit der Ladetechnik ebenso einstellbar gestaltet werden. Die Positionierung der Ladetechnik wird hier nicht weiter betrachtet, da sich die Betreiber einstimmig im Vorfeld für eine Platzierung derer an den schon vorhandenen Parkplätzen der Fahrzeuge ausgesprochen haben. Dies dient dazu, die vorgeschriebenen Pausenzeiten der Fahrer nutzen zu können, um das Fahrzeug laden zu können. Im Anwendungsfall CTA beispielsweise wird ca. 12 % einer regulären acht Stunden Schicht für eine solche Pause aufgewendet. Weiterhin ist es für die Bewertung der Flottenkonstellationen erforderlich, das im Arbeitspaket 1.2 aufgebaute TCO-Modell in die Umgebung einzubinden und somit eine wirtschaftliche Bewertung zu ermöglichen.

Die Komponentendaten des Antriebs sowie der relevanten Nebenverbraucher und die Topologie des Fahrzeugs werden von Konecranes zur Verfügung gestellt. Der Aufbau der entsprechenden Simulationsmodelle wird im Arbeitspaket 4.1 durchgeführt.

2.1.1.2 Erstellung des Referenzzyklus CTA-TT

Neben der Simulation des Gesamtsystems wird für die Analyse des Anwendungsfalls Terminal Tractor am Container Terminal Altenwerden ein repräsentativer Referenzzyklus erstellt. Hierzu

wird vom CTA ein Datensatz über einen Monat aus dem Terminal Operating System (kurz TOS) zur Verfügung gestellt. In diesem sind sämtliche Containerbewegungen des Systems Terminal Tractor für einen Monat enthalten. Beschrieben werden diese in einer Tabelle in derer die Zeiten und Positionen der Abholung und Ablieferung der Container sowie die eindeutige Bezeichnung des abholenden Fahrzeugs hinterlegt sind. Zur Analyse dieser Daten wird zunächst eine Klassifizierung der Fahrzustände eines jeden einzelnen Fahrzeugs durchgeführt. Hierzu werden zunächst zwei wesentliche Zustände des Fahrzeugs definiert:

- Zustand „Stillstand“: Dieser liegt vor, wenn das Fahrzeug mindestens 25 Minuten keinen Auftrag ausführt
- Zustand „Fahren“: Alle Zeitbereiche, in denen das Fahrzeug sich nicht im Zustand „Stillstand“ befindet.

Das Zeitintervall von 25 Minuten wird gewählt, sodass die kürzeste auftretende Pausendauer von 15 Minuten inklusive An- und Abfahrt vom Parkplatz gewährleistet ist. Die so erhaltene Verteilung der Dauer der einzelnen Fahrperioden ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

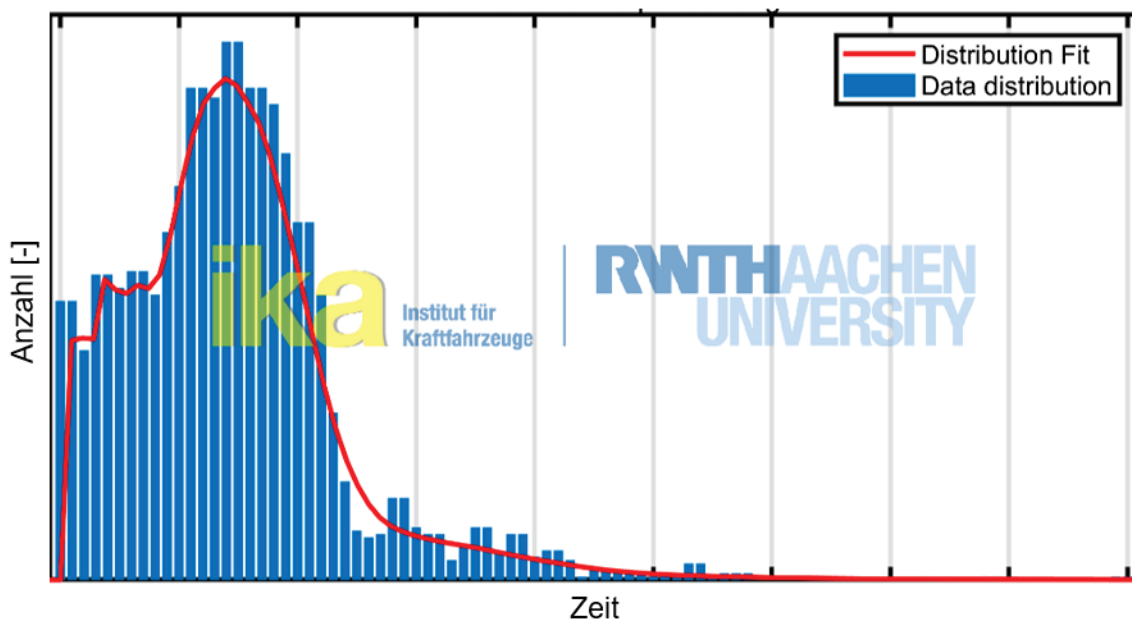


Abb. 2-1: Verteilung der Dauer der einzelnen Fahrperioden

Es ist eine deutliche Verschiebung der Verteilung hin zu kurzen Fahrperioden zu erkennen. Auch wenn einzelne sehr lange Perioden in den Daten zu erkennen sind, treten diese nur äußerst selten auf.

In einem weiteren Schritt werden die originalen Zyklen der Fahrzeuge mit den in den Arbeitspaketen 4.1 und 4.2 erzeugten Simulationsergebnissen hin untersucht. Die Daten werden um die Verbindungsrouen der Aufträge, welche nicht in den TOS-Daten aufgezeichnet wurden, sowie den Fahrten zum und vom Parkplatz hin ergänzt. Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass zur Abdeckung von 100 % aller Fahrperioden eine energetische Kapazität des

Speichers der Fahrzeuge von ca. 260 kWh erforderlich ist. Dies ist, wie zu erwarten, als sehr groß zu bewerten. In Kombination mit Blick auf die in Abb. 2-1 dargestellte Verteilung wird diese Kapazität nur sehr selten benötigt und würde bei Auslegung des Speichers auf dieses Kriterium enorme Investitionen in die Fahrzeuge bedeuten.

Für den erstellten Referenzzyklus werden die Randbedingungen daher definiert, dass sie dem äußerst seltenen auftreten der langen Fahrperioden Rechnung tragen. Hierzu werden zwei Zyklen erstellt: Der erste Zyklus soll die mittlere Verteilung der Zustände Fahren bzw. Stillstand abdecken, wobei im Zyklus die längste auftretende Fahrperiode dem 99 %-Perzentil entspricht, also 99 % aller Anwendungsfälle am CTA abdeckt. Der zweite Zyklus wird unter den gleichen Randbedingungen erstellt, jedoch wird hier für die längste Fahrperiode das 95 %-Perzentil gewählt. Beide Zyklen werden über eine Dauer von sieben Tagen erstellt. Grund dafür ist, dass diese Dauer die längste relevante Dauer des Systems darstellt, da nach dieser Dauer eine Nachtschicht nicht vom System bedient wird und so davon ausgegangen werden kann, dass alle Fahrzeuge nach Nachtschicht wieder vollgeladen werden können. Die Erstellung der beschriebenen Zyklen erfolgt in Anlehnung an die von [KOO15] verwendete Methodik zur Erstellung von Zyklus aus der Datenbasis des WLTP.

Enthalten in den Daten dieser beiden Zyklen sind das vollständige Geschwindigkeitsprofil der Fahrzeuge, der Fahrleistungsbedarf der Fahrzeuge sowie ein Parameter der zeitabhängig angibt, wann das Fahrzeug geladen werden kann bzw. an einer Ladeposition steht. Hier ist bewusst noch keine explizite Ladeleistung angegeben, da gerade die Abfolge von Fahrperioden und Pausen sowie die in den Pausen verfügbare Ladeleistung einen enormen Einfluss auf die notwendige energetische Kapazität des Speichers hat. Aus diesem Grund werden die erstellten Zyklen nun im Folgenden mit Ladeleistungen von 5 kW bis 300 kW untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung für den ersten Zyklus sind in der folgenden Abbildung dargestellt. In der Abbildung unten sind lediglich die Ladeleistungen von ca. 60 kW bis 300 kW dargestellt, da niedrigere Ladeleistungen aus Sicht des ika für diesen Anwendungsfall nicht in Frage kommen. Diese würden enorme, nicht wirtschaftliche Kapazitäten der Traktionsbatterien der Fahrzeuge erfordern.

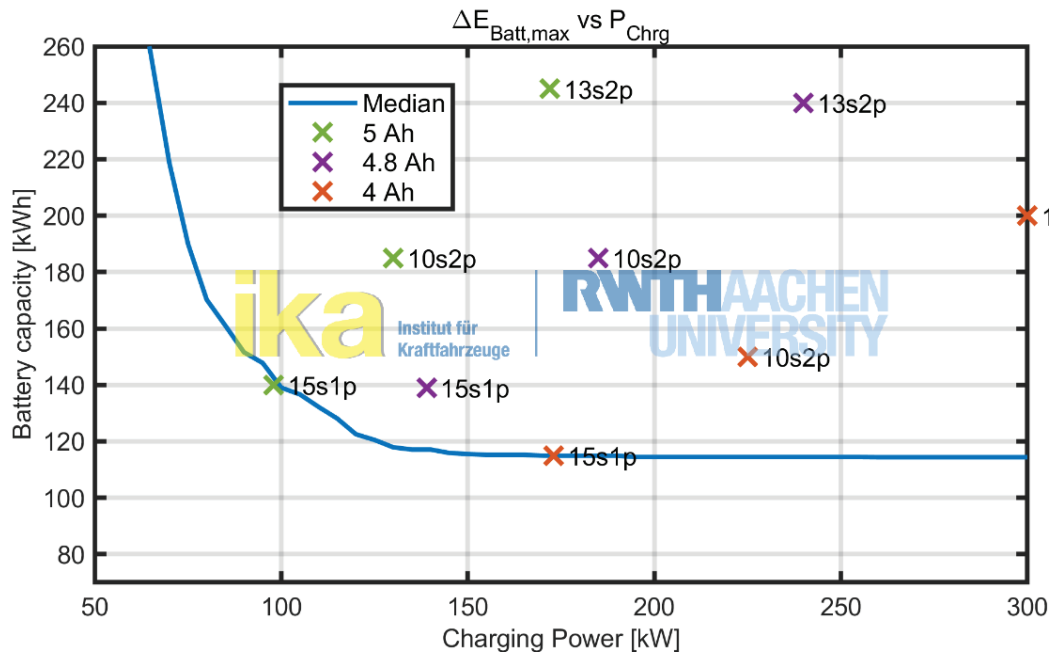


Abb. 2-2: Erforderliche Batteriekapazität über Ladeleistung für den 99 % Zyklus

In der Grafik ist deutlich die deutliche Abhängigkeit der beiden Parameter voneinander zu erkennen. Zunächst ist der Zusammenhang, dass eine höhere Ladeleistung eine geringere erforderliche Batteriekapazität mit sich bringt, festzuhalten. Jedoch ist ebenfalls zu erkennen, dass ab einer Leistung von ca. 150 kW keine geringere erforderliche Kapazität mehr erreicht werden kann. Die erforderliche Kapazität weist nach diesen Berechnungen einen Grenzwert nach unten von 115 kWh auf. Dies bedeutet aus wirtschaftlicher Sicht, dass die Mehrkosten, die eine potentere Ladetechnik mit sich bringt, hier nicht mehr durch die Einsparung aufgrund eines kleineren Energiespeichers aufgefangen werden kann.

Weiterhin sind in der Abbildung die möglichen Modulverschaltungen der durch BMZ ausgearbeiteten Batteriekonzepte für alle in Betracht kommenden Zellen basierend auf den Angaben in den zur Verfügung stehenden Datenblättern dargestellt. Die Abbildung ist so zu interpretieren, dass alle Konzepte, welche sich rechts oberhalb der Kurve befinden, für den Anwendungsfall geeignet sind sowie im Gegenzug, dass alle Konzepte links unterhalb nicht geeignet sind. Dies bedeutet für die betrachteten Konzepte, dass theoretisch alle Konzepte die Anforderungen erfüllen, jedoch sind die Konzepte 15s1p mit den Zellen 5 Ah sowie 4 Ah als kritisch zu bewerten, da diese genau den Grenzfall darstellen und keinen Sicherheitsfaktor mehr beinhalten würden. Auf Grundlage der Berechnungen kann also das 15s1p Konzept aufgebaut aus den 4,8 Ah Zellen bei minimaler Einschränkung des Betriebsablaufs empfohlen werden.

Das Ergebnis der Auswertung des zweiten Zyklus, welcher 95 % aller Fälle abdeckt, ergibt sich eine minimal erforderliche Kapazität von lediglich 80 kWh. Diese Anforderung in Kombination mit den hierzu erforderlichen Ladeleistungen kann von allen Konzepten sicher

erfüllt werden. Jedoch ist hier mit deutlich größeren Auswirkungen auf den Betriebsablauf zu rechnen.

2.1.1.3 Referenzzyklus DCH-TT

Zur Betrachtung des Anwendungsfalls Düsseldorfer Container Hafen wird in ähnlicher Weise wie eingangs für das CTA beschrieben vorgegangen. Die hier vom Betreiber zur Verfügung gestellten Daten weisen jedoch eine deutlich geringere Auflösung als die des CTA auf, weshalb eine Erstellung eines gleichwertig repräsentativen Zyklus hier nicht möglich ist. Zur Verfügung gestellt werden die insgesamt monatlich durchgeführten Fahrten des Terminal Tractors über die Dauer von zwei Jahren nach Art der Tour klassifiziert. Am DCH sind die Fahrzeuge täglich 16 h am Stück gefolgt von einer 8-stündigen Pause im Einsatz. Hier werden in direkter Absprache mit dem Betreiber insgesamt drei Lastzyklen definiert. Diese sind in der untenstehenden Tabelle dargestellt.

| LASTFALL | L1 | L2 | L3 |
|--------------|--------|--------|-------|
| FAHRZEIT | 6,2 h | 4,2 h | 2,2 h |
| HANDLINGZEIT | 9,7 h | 6,5 h | 4,0 h |
| GESAMTZEIT | 15,9 h | 10,7 h | 6,2 h |

Abb. 2-3: Definierte Lastfälle für den Düsseldorfer Container Hafen

Der Lastfall L1 beschreibt hier die maximale Auslastung eines Terminal Tractors für einen Tag. Der Lastfall L2 bezeichnet die Auslastung, welche im Mittel im Monat mit dem höchsten Arbeitsaufkommen zu erwarten ist. Der Lastfall L3 stellt das absolute Mittel des Aufkommens dar, welches aus den Daten ersichtlich ist.

Diese Lastfälle werden im Folgenden analog zum vorher beschriebenen Vorgehen mit den Daten aus den Arbeitspaketen 4.1 und 4.2 untersucht. Hierbei werden die Fahrzeiten mit den vom Betreiber angegebenen Routen sowie den dazugehörigen Energiebedarfen dieser befüllt und anschließend ausgewertet. Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

| LASTFALL | L1 | L2 | L3 |
|--------------------|---------|---------|--------|
| TAGESENERGIEBEDARF | 265 kWh | 120 kWh | 97 kWh |

Abb. 2-4: Energetische Auswertung der erstellten Lastfälle

Aus den erhaltenen Ergebnissen ist zu schließen, dass die Lastfälle L2 und L3 von einem Fahrzeug mit dem hier konzeptionierten Batteriesystem bewältigt werden können. Lastfall L1 jedoch ist als kritisch zu bewerten, da hier keine Pausen für eine Zwischenladung der Batterie genutzt werden können. Hier wäre also entweder eine Fahrzeugwechselstrategie oder die Anschaffung eines Fahrzeugs mit einer deutlich größeren Traktionsbatterie angebracht.

2.1.1.4 Betrachtete Betriebs- und Ladestrategien

Die in Arbeitspaket 4.2 aufgebaute Flotten- und Logistiksimulation bietet die Möglichkeit, unterschiedliche Ladestrategien abzubilden und simulativ zu bewerten. Im Rahmen dieses Projekts werden im Wesentlichen 3 Strategien untersucht. Diese sind unten aufgeführt:

- Plug and Charge
- Opportunity Charging
- Overnight Charging

Erstere bezeichnet hierbei eine Strategie, bei derer die Fahrzeuge so lange fahren, bis der Energieinhalt nicht mehr ausreichend ist und die Fahrzeug aufgrund ihrer Betriebsgrenzen geladen werden müssen. Zweitere bezeichnet das Laden im Betriebsablauf, wenn sich gerade die Gelegenheit dazu ergibt. Letztere bezeichnet das Vollladen der Fahrzeuge außerhalb ihrer Betriebszeiten, beispielsweise über Nacht.

In der Umgebung werden alle drei der genannten Strategien umgesetzt, da aufgrund der Besonderheiten des Anwendungsfalls keine einzelne Strategie ausgewählt werden kann. Hier wird zunächst im Rahmen des Opportunity Chargings geladen, wenn die Fahrer in Pause sind oder ein Fahrzeug aufgrund eines insgesamt niedrigen aktuellen Transportaufkommens kurzfristig zum Laden außer Betrieb genommen werden kann. Die Plug and Charge Strategie greift dann, wenn das Transportaufkommen so hoch ist, dass die zuerst genannte Strategie nicht greifen kann und die Fahrzeuge erst aufgrund ihrer eigenen harten Betriebsgrenzen zwangsläufig geladen werden müssen. Die letztgenannte Strategie findet ebenfalls Anwendung, um die Stillstandszeit der Fahrzeuge möglichst effizient nutzen zu können.

Das Lademanagement ist programmiert, so wenig Einfluss wie möglich auf den Betriebsablauf zu nehmen, da dies in Rücksprache mit den Hafenbetreibern für einen ersten Einsatz einer elektrifizierten Flotte die höchste Priorität darstellt. Die Fahrzeuge werden daher nicht aktiv zum Laden außer Betrieb genommen, ein direkter Eingriff in den Betrieb findet hier also nicht statt. Untersucht werden hier auch Strategien mit Ladeanreizen, die einen möglichst schonenden Ladevorgang der Batterie zu gewährleisten.

Weiterhin bietet die Umgebung die Möglichkeit, das Lastmanagement an der Ladetechnik abzubilden und zu untersuchen. Allgemein besteht hier die Möglichkeit, mithilfe von Vehicle to Grid (V2G) Strategien die Ladevorgänge weiter zu optimieren. Diese werden jedoch an dieser Stelle nicht weiter untersucht.

2.1.1.5 Zusammenfassung

In diesem Arbeitspaket können zunächst für in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern für Anforderung an die in Arbeitspaket 4.1 und 4.2 entwickelten Simulationsumgebungen gestellt werden. Weiterhin werden erforderliche Daten zur Parametrierung der Modelle ausgetauscht.

Für die Anwendungsfälle CTA und DCH können Referenzzyklen erstellt werden, anhand derer sich eine Vorauslegung der Fahrzeuge sowie der Ladetechnik für den jeweiligen Anwendungsfall durchführen lässt. Weiterhin werden für diese Anwendungsfälle verschiedene Betriebs- und Ladestrategien ausgearbeitet und untersucht.

2.1.2 Arbeitspaket 1.2 – Technisch-wirtschaftliche Betrachtung

2.1.2.1 Zielsetzung und Fragestellungen

Für die wirtschaftliche Bewertung ist das Ziel ein möglichst allgemeingültiges Total-Cost-of-Ownership-Modell (TCO-Modell) aufzubauen, mit dem die Gesamtkosten unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen (z. B. Flottengrößen, Einsatzzeiten, Betriebsstrategie) ermittelt werden können. Dabei sollten auch technische Wechselwirkungen zwischen einzelnen Einflussgrößen berücksichtigt werden. Beispielsweise ob und wie sich höhere Kosten aufgrund höherer Ladeleistungen evtl. durch eine geringere Anzahl von benötigten Fahrzeugen kompensieren lassen. Neben den batterie-elektrischen Fahrzeugen und der entsprechenden Ladeinfrastruktur sollte ebenfalls ein herkömmlicher Einsatz mit diesel-betriebenen Zugmaschinen abgebildet werden. Das TCO-Modell sollte dann auf die aktuellen und möglicherweise zukünftigen Betriebssituationen bei CTA, DCH und NTM angepasst werden. Folgende Fragestellungen wurden hierbei definiert:

- Welche Betriebsstrategie ist die wirtschaftlichste Alternative?
- Ist ein wirtschaftlicher Einsatz im Vergleich mit diesel-betriebenen Zugmaschinen möglich?
- Nach wie vielen Betriebsjahren ist der Return-of-Invest erreicht?
- Welche Parameter sind besonders relevant für einen wirtschaftlichen Betrieb (Sensitivitätsanalyse)?
- Welche wirtschaftlichen Optimierungsmaßnahmen sind bzgl. der TCO am wirksamsten?

2.1.2.2 Aufbau des TCO-Modells

Zur Ermittlung der im TCO-Modell zu betrachtenden Kostenpositionen wird zunächst recherchiert wie sich die Gesamtbetriebskosten von Kraftfahrzeugen zusammensetzen und bei der Elektrifizierung von Einzelfahrzeugen oder einer Flotte verändern. Nach [FIS15] hat die Elektrifizierung keinen signifikanten Einfluss auf die Kosten für Fahrer, Verwaltung und Reifen (bei entsprechender Applikation und gleicher Masse). Die Investitionskosten und Abschreibungen steigen im Zuge der Elektrifizierung wohingegen Treibstoff- bzw. Energiekosten, die Kosten für Steuern und Versicherung, Wartung und Instandhaltung und sonstige Gebühren in der Regel sinken. Eine Bewertung des Wiederverkaufswertes und der Recyclingkosten ist aufgrund der mangelnden Datenlage zum aktuellen Zeitpunkt nicht möglich. Entsprechend fließen der Wiederverkaufswert bzw. die Recyclingkosten sowie die Kosten für Fahrer, Reifen und die Verwaltung nicht in die TCO-Betrachtung ein.

2.1.2.3 Treibstoff- und Energiekosten

Um mit dem TCO-Modell Kostenprognosen mindestens für den Zeitraum der typischen Haltedauer der betrachteten Fahrzeuge durchzuführen, werden Prognosen der Preisentwicklung von Energie und Treibstoff benötigt. Die Entwicklungen der Diesel- und Strompreise werden unter Berücksichtigung der CO₂-Bepreisung und der geplanten Reduzierung der EEG-Umlage prognostiziert und sind in Abb. 2-5 und Abb. 2-6 dargestellt. Die steigenden Dieselskosten resultieren hierbei im Wesentlichen aus der CO₂-Bepreisung. Für diese wird gemäß des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG) zunächst eine schrittweise Erhöhung auf 55 €/tCO₂-Äquivalent bis zum Jahr 2025 festgelegt und entsprechend in der Preisentwicklung berücksichtigt. [BUN19], [BUN20a], [ISE10], [KER20], [LÖS19], [MWV04], [MWV06], [PRE19], [PRE20a], [PRE20b], [SCO20]

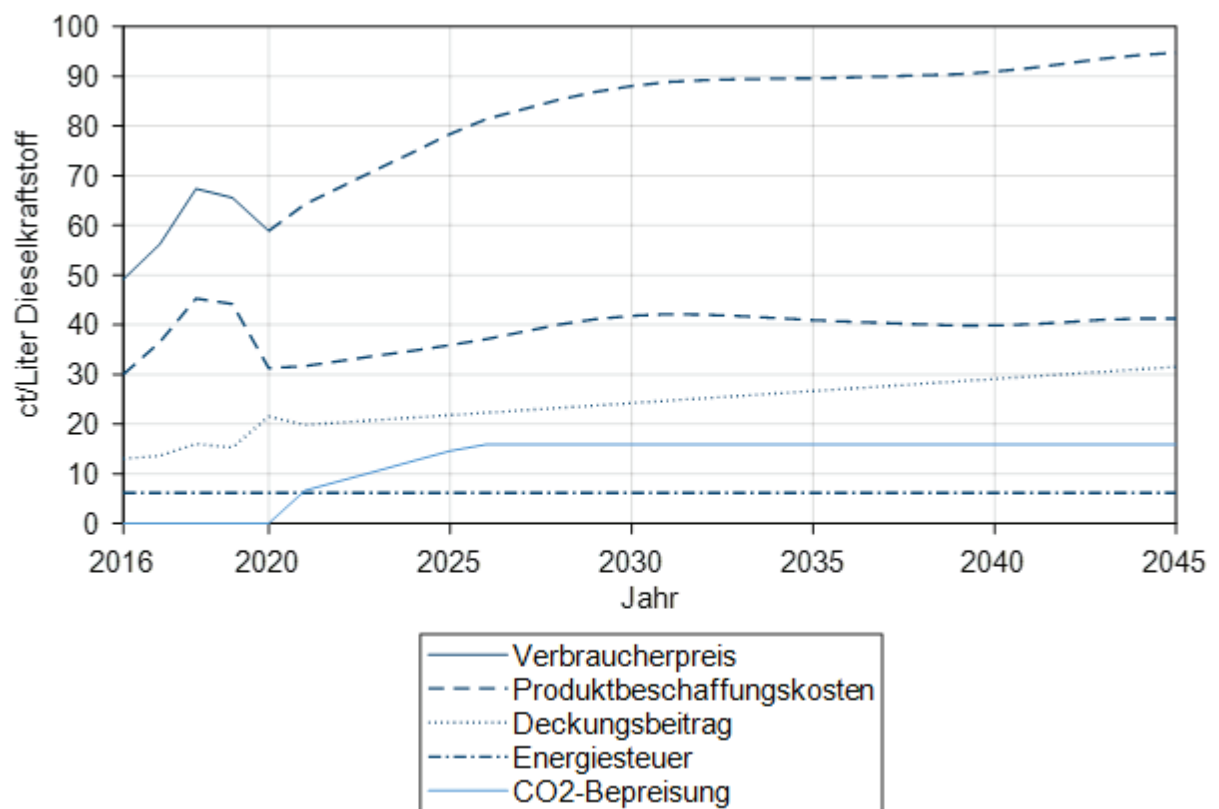


Abb. 2-5: Prognose der Dieselpreisentwicklung bis 2045

Die Prognose der Strompreisentwicklung basiert auf einer Kurzstudie des Energiewirtschaftlichen Instituts der Universität Köln. Demnach steigen die Kosten für Beschaffung, Vertrieb und Netzentgelt, während die EEG-Umlage auf lange Sicht entfällt. In diesem Zeitrahmen spielt auch die CO₂-Bepreisung eine geringfügige Rolle, da hierdurch die CO₂-Emissionen durch die Stromproduktion entsprechend berücksichtigt werden. Aufgrund steigender Brennstoffpreise, der EU ETS Zertifikatspreise und wegfallender Förderung von Altanlagen wird die EEG-Umlage unabhängig vom Szenario gegen Null tendieren. Im Wesentlichen unterscheiden sich mögliche Szenarien laut der Studie nur durch die

Entwicklung der EEG-Umlage von der Gegenwart bis zum Jahr 2050. Da die Höhe der EEG-Umlage in der Kurzstudie allerdings nur für 2030 und 2050 angegeben wird, wird zur Beschreibung der jährlichen Entwicklung der EEG-Rechner des Öko-Institut e.V. herangezogen. Mit den Angaben aus den genannten Quellen ergibt sich der in Abb. 2-6 dargestellte Verlauf für den Strompreis. [WAG19], [HAL15]

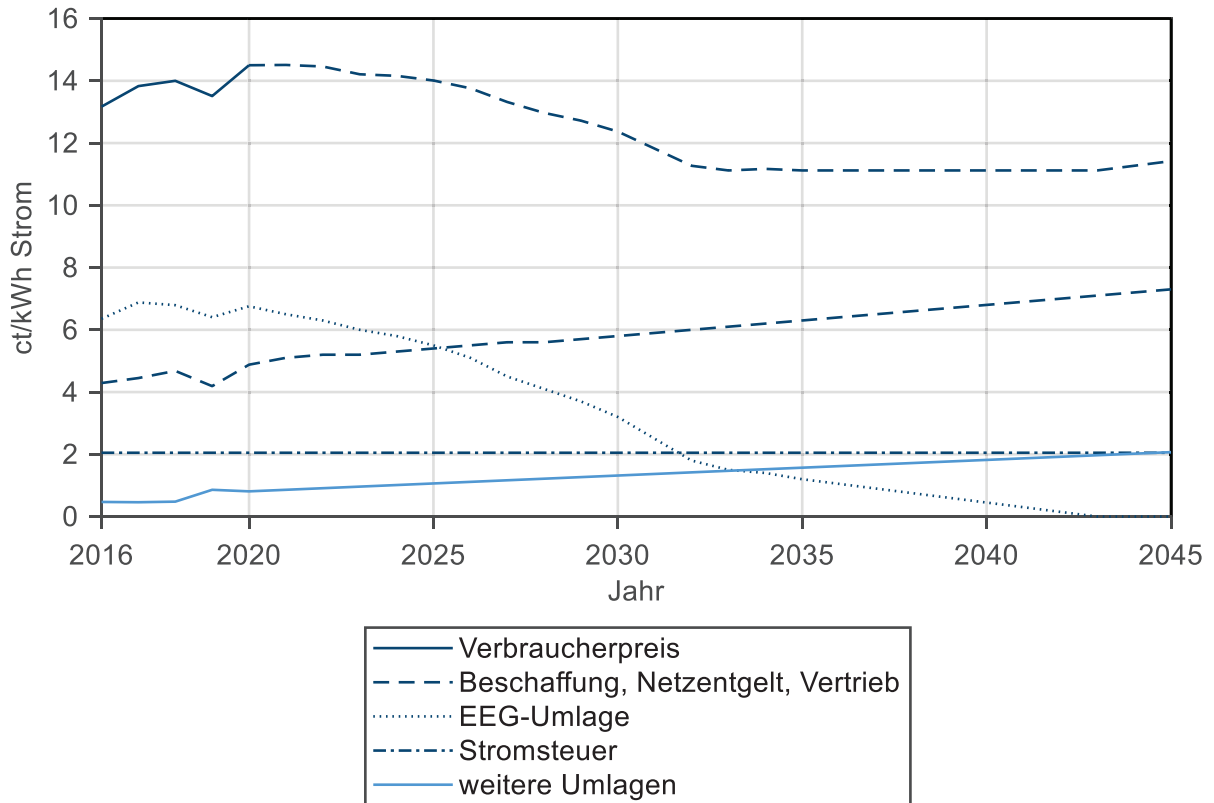


Abb. 2-6: Prognose der Strompreisentwicklung bis 2045

2.1.2.4 Weitere Kostenpositionen

Um die Investitionskosten möglichst genau abschätzen zu können werden folgende Komponentenkosten und sofern möglich Prognosen für deren Kostenentwicklungen recherchiert.

- Kosten des Dieselmotors (inkl. Prognose)
- Kosten des Elektromotors (inkl. Prognose)
- Kosten der Leistungselektronik (inkl. Prognose)
- Kosten der Batterie (inkl. Prognose)
- Kosten der Ladeinfrastruktur
- Wartungskosten
- Kraftstoffverbrauch bzw. Energiebedarf (anhand der vorliegenden Logistikdaten zusammen mit der Längsdynamiksimulation)

Anhand der Investitionskosten können, zusammen mit den elektroantriebsspezifischen Komponentenkosten, die Kosten für den sogenannten „Glider“ berechnet werden. Als Glider wird die Basis für ein Fahrzeug bezeichnet, die alle Komponenten mit Ausnahme des

Antriebsstrangs enthält. Durch die Berechnung der Gliderkosten können im TCO-Modell die einzelnen Komponentenkosten variiert werden. Zusätzlich wird der Retail-Price-Equivalent-Faktor (RPE-Faktor) mit einbezogen, mit dem die indirekten Kosten (z. B. Garantieleistungen, innerbetrieblicher Transport, Forschung- und Entwicklung, Gewinnmarge) von Herstellern abgeschätzt werden können. Anhand der Ergebnisse der Literaturrecherche werden die RPE-Faktoren auf 1,7 für batterieelektrische Terminal Trucks und auf 1,4 für dieselbetriebene Terminal Trucks festgelegt. [OKE11], [BRE16], [FRI17], [DEN13], [KAM18], [HIL12], [OKE11]

2.1.2.5 Ermittlung und Bewertung der Fahrzeug- und Flotten-TCO

Anhand der vorab beschriebenen Kostenpositionen wird das in Abb. 2-7 dargestellte Berechnungsschema entwickelt und in einem Berechnungstool in Matlab Simulink umgesetzt. Hierin können Kaufzeitpunkt, Haltedauer, Betriebsstunden, Gliderkosten, Kosten für Betriebsprüfungen, Angaben zur Geldwertänderung, Leistung des Antriebsmotors, Kapazität der Batterie, Energie- bzw. Kraftstoffbedarf, Wartungskosten, Flottenkonstellation und die Randbedingungen der Ladeinfrastruktur variiert werden. Die Sensitivitätsanalyse ergibt hierbei, dass die Betriebsstunden insgesamt den größten Einfluss auf die TCO haben. Durch den höheren Antriebsstrangwirkungsgrad von batterie-elektrischen Fahrzeugen steigen die TCO bei BEVs im Vergleich zu dieselbetriebenen Fahrzeugen weniger stark bei steigenden Betriebsstunden. Dies führt umgekehrt dazu, dass bei weniger Betriebsstunden die TCO für konventionelle Fahrzeuge stärker sinken als die von BEVs.

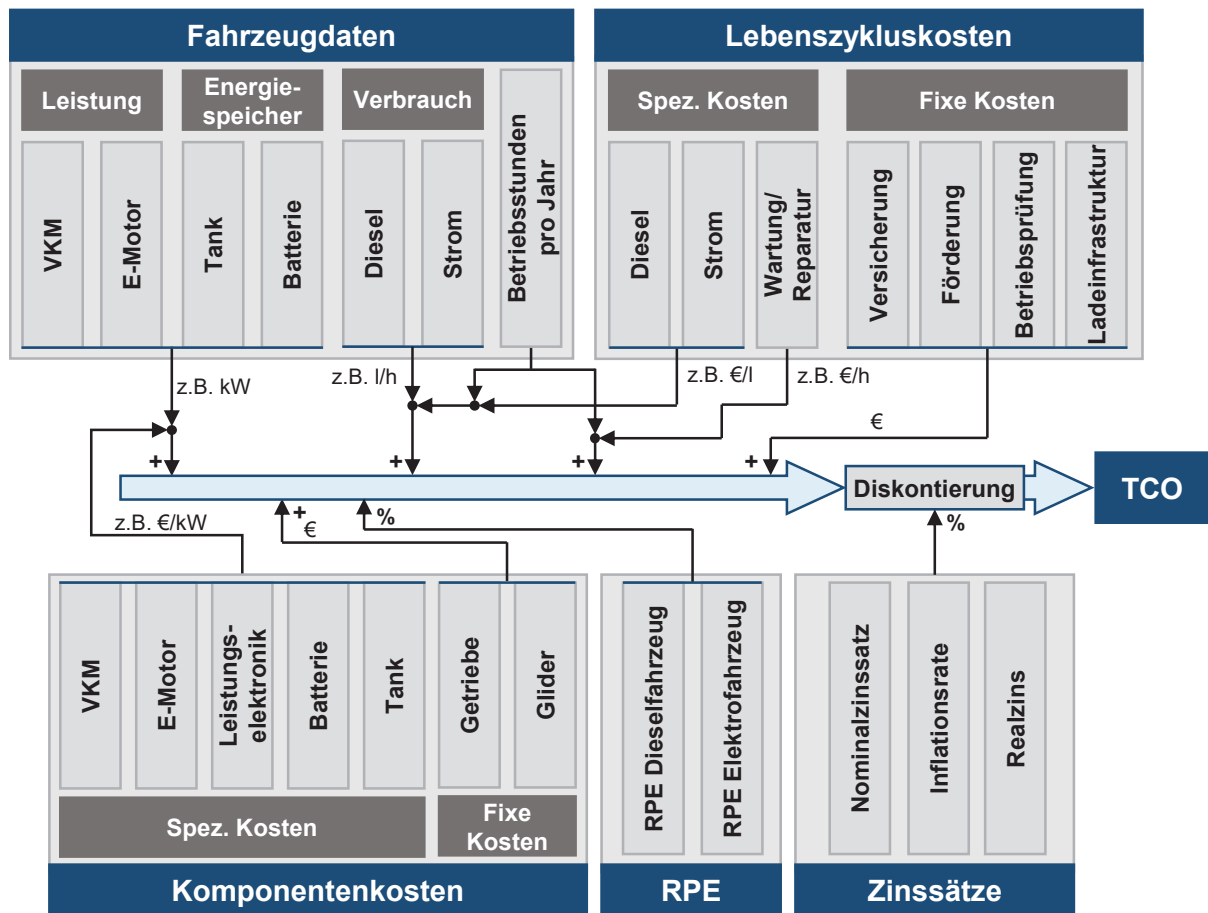


Abb. 2-7: Zusammensetzung bzw. Berechnungsschema des TCO

Anhand des entwickelten Modells, den vorliegenden Betriebsdaten und der Längsdynamiksimulation werden schließlich die TCO von dieselpetriebenen und batterieelektrischen Zugmaschinen miteinander verglichen. Wie durch die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zu erwarten ist, können die hohen Kosten einer großen Batterie durch eine entsprechend hohe Zahl von Betriebsstunden kompensiert werden. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 2-8 dargestellt. Je nach dem ob staatliche Förderungen und die zusätzliche Anschaffung einer Ladesäule berücksichtigt werden, ist der Einsatz eines batterieelektrischen Terminal Trucks wirtschaftlich sinnvoll. Unter der Annahme, dass die Ladeinfrastruktur bereits vorhanden ist, ist dies für 64 % der Fahrzeuge aus der Flotte der Fall. Bei drei von fünf der Zugmaschinen, deren Elektrifizierung nicht wirtschaftlich ist, handelt es sich aller Wahrscheinlichkeit nach um Reservefahrzeuge, was an der geringen Anzahl von Betriebsstunden zu erkennen ist. Da sich die TCO für dieselpetriebene Zugmaschinen bei einer geringen Anzahl von Betriebsstunden positiver entwickeln als die für batterieelektrische, bietet es sich an dieselpetriebene Zugmaschinen als Reservefahrzeuge einzusetzen.

Zusammengefasst kann die Frage, ob ein wirtschaftlicher Einsatz im Vergleich mit dieselpetriebenen Zugmaschinen möglich ist durch das TCO-Modell beantwortet werden. Selbst unter Berücksichtigung der Erstanschaffungskosten von einer Ladesäule je Fahrzeug, kann

der Einsatz innerhalb einer Haltedauer von 7 Jahren bereits zum jetzigen Zeitpunkt wirtschaftlich sein. Bei bestehender Ladeinfrastruktur und unter Berücksichtigung der Prognosen der Komponenten- und Energiekosten ist außerdem damit zu rechnen, dass die TCO von batterie-elektrischen Zugmaschinen in der Zukunft weiter sinken und sich die Fahrzeuge somit in weniger als 7 Jahren amortisieren. Weiteres Potenzial besteht darin, die Flotte gleichmäßiger auszulasten. Hierdurch kann das Verhältnis von Batteriekapazität und Betriebsstunden weiter verbessert werden, wodurch die TCO sinken und die Wirtschaftlichkeit steigt.

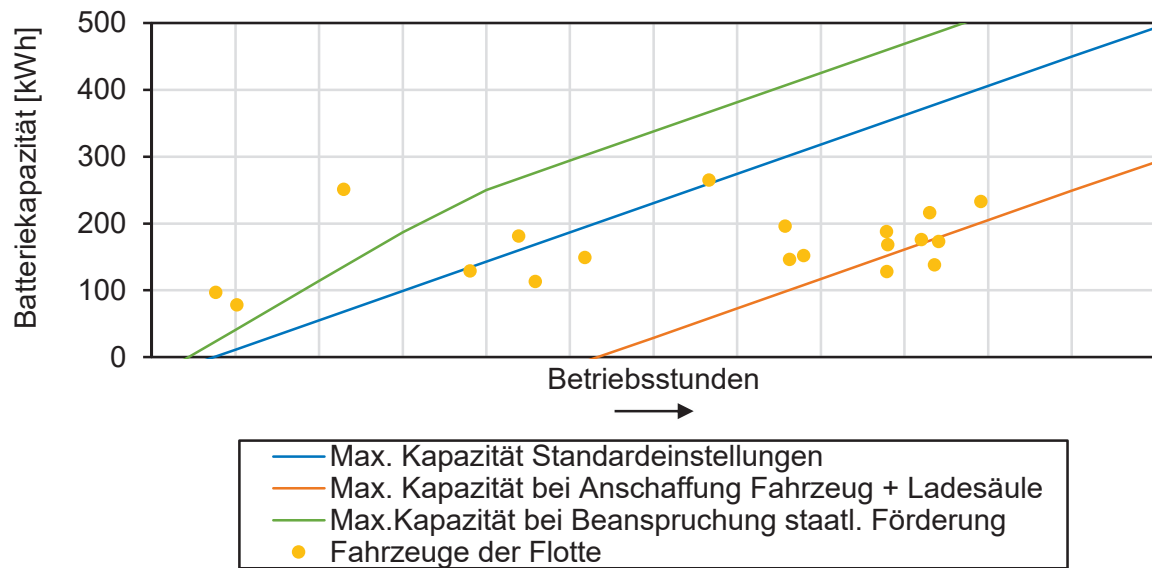


Abb. 2-8: Maximale Batteriekapazität in Abhängigkeit der Betriebsstunden, um dieselben TCO wie ein konventionelles Fahrzeug zu realisieren

2.1.3 Arbeitspaket 1.3 – Anwendungsfälle

Zur Parametrierung der Längsdynamikmodelle kann auf Messungen aus dem Projekt „Batterie-elektrischer Terminal Truck im Feldversuch“ zurückgegriffen werden. Anhand dessen werden die Leistungs- und Energieaufnahme im Längsdynamik-Simulationsmodell validiert, um die Komponentenauslegung zu einem möglichst frühen Zeitpunkt auch für andere Anwendungsfälle mittels Simulationen zu unterstützen. Dies ist möglich, weil der Truck im Container Terminal Altenwerder (in SUMO abgebildet) eingesetzt wird. Grundsätzlich ließen sich gute Ergebnisse erzielen, jedoch fällt bei der Sichtung der Messdaten auf, dass in der Messung des Batteriestromes nicht alle Nebenverbraucherströme enthalten sind. Da die Ströme der Komponenten ebenfalls nicht einzeln gemessen werden, ließ sich das Modell nur zu einem gewissen Grad verbessern. Für zukünftige Messungen sollte daher angestrebt werden nach Möglichkeit die Leistung jedes einzelnen elektrischen Verbrauchers, aber zumindest die gesamte Batterieleistung zu messen.

Für den Betrieb im Container Terminal Altenwerder können die vorliegenden Messdaten außerdem direkt ausgewertet werden. Eine Betrachtung umfasste die Auswertung der maximalen Dauer unterschiedlicher Leistungsanforderungen. Hierbei zeigt sich, dass die Maximalleistung der verbauten E-Maschine nur sehr selten abgerufen wird und somit Potenzial besteht eine kleinere E-Maschine zu verwenden. Entsprechend werden E-Maschinen unterschiedlicher Leistungen in der Simulation miteinander verglichen. In Abb. 2-9 ist einer dieser Vergleiche und die entsprechende Steckle dargestellt. Hierbei wird das Simulationsmodell mit einer 283 kW und einer 220 kW E-Maschine konfiguriert. Das Derating wird über einen Heat-Up-Faktor dargestellt, der anhand des Integrals der E-Maschinenleistung berechnet wird. Ab einem Heat-Up-Faktor von 0,6 (iterativ ermittelt) erfolgte dann das Derating. Wie zu sehen, erfolgte selbst bei einer Fahrt mit 23,5 t kein Derating. Für zukünftige Projekte sollte also angestrebt werden auf möglichst realistische Fahrprofile inkl. der Beladungsmasse zurückzugreifen, um die E-Maschine und insbesondere die Traktionsbatterie hinsichtlich ihrer Leistungen optimal zu dimensionieren.

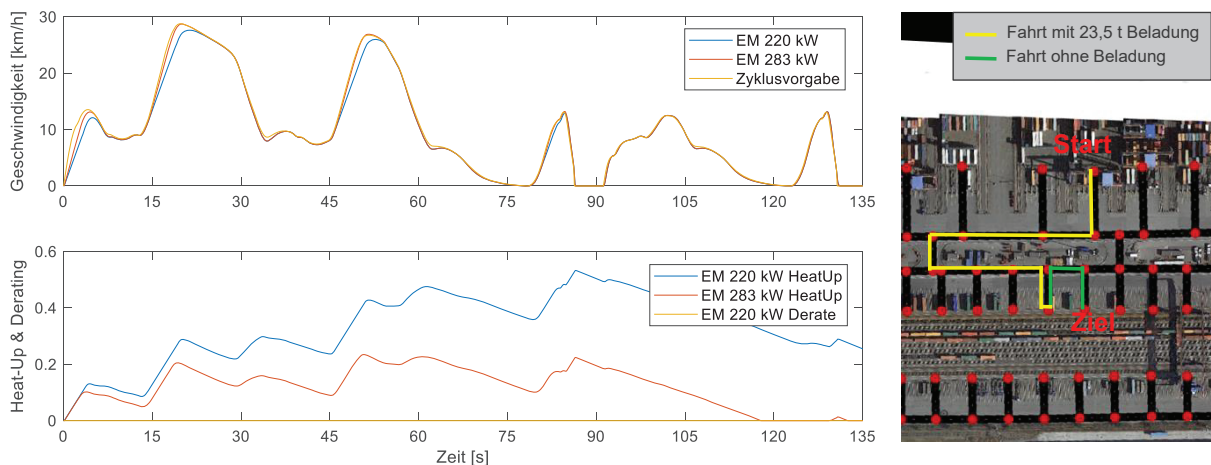


Abb. 2-9: Vergleich einer 283 kW und 220 kW E-Maschine auf einer CTA-Stecke

2.1.4 Arbeitspaket 3.1 – Batterie

Die durchgeführten Tests lassen sich in die zwei Kategorien Batteriecharakterisierung und Zyklustesting unterscheiden. Im Rahmen der Batteriecharakterisierung sind Tests durchgeführt worden welche eine Parametrierung eines Batteriemodells für die Antriebsstrangsimulation ermöglichen. Anschließend wurden verschiedene charakteristische Lastzyklen, die im Rahmen dieses Projektes erarbeitet wurden (vgl. Arbeitspaket 1.1), bei verschiedenen Randbedingungen durchfahren um zu prüfen ob diese durchfahren werden können.

Für diese Untersuchungen wurde das 48 V Batteriemodul an den Batterieprüfstand angeschlossen, vgl. Abb. 2-10. Der Batterieprüfstand besteht aus einer Klimakammer welche eine Temperierung von -40 bis 70 °C ermöglicht und der Leistungselektronik welche eine

elektrische Leistung von 400 kW bei maximal 1000 V und 1000 A abdeckt. Somit genügt der Prüfstand den Anforderungen für dieses Vorhaben.



Abb. 2-10: Batterieprüfstand

2.1.4.1 Instrumentierung

In der Vorbereitung wurde das Batteriemodul mit Messtechnik ausgestattet. Zum einen kann über einen CAN Anschluss das Signal des Batterieslaves eingelesen werden, sodass die Sensoren die der Überwachung durch das BMS dienen ausgelesen werden können. Hierzu gehören die Zellspannungen der 13 seriell verschalteten Zellen und vier Temperatursensoren. Darüber hinaus wurden sieben weitere Temperatursensoren auf Batteriezellen an der Unterseite des Moduls (vgl. Abb. 2-11) und ein Temperatursensor auf der Stromschiene des

Minuspols installiert. Ein weiterer Stromsensor dient der Überwachung des Stroms. Alle Signale werden in CAN Signale gewandelt und an den Prüfstandsrechner übertragen.

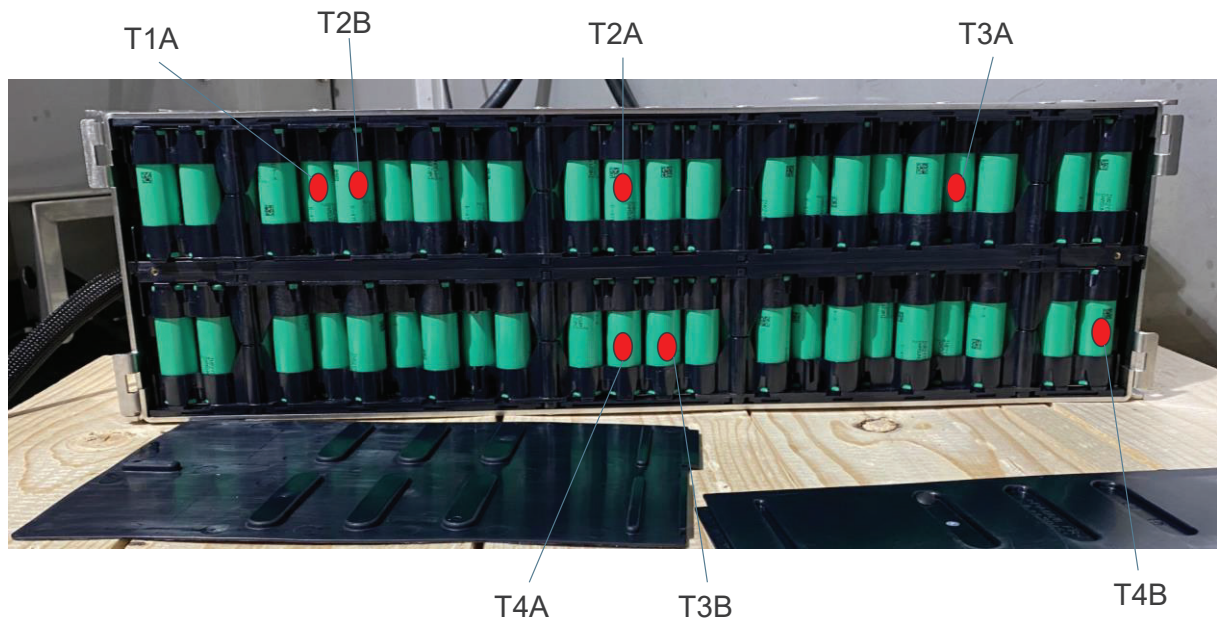


Abb. 2-11: Positionen der Temperatursensoren auf den Batteriezellen an der Modulunterseite

2.1.4.2 Batteriecharakterisierung

Die Tests welche im Rahmen der Batteriecharakterisierung durchgeführt wurden, lassen sich in Tests zur Bestimmung der nutzbaren Kapazität und Leerlaufspannung sowie zur Bestimmung der RC Glieder unterteilen.

2.1.4.3 Konstantstrommessung

Zur Bestimmung der nutzbaren Kapazität und Leerlaufspannung kommt die Konstantstrommessung zum Einsatz. Das Modul wird hierfür mit einem geringen, konstanten Strom ge- und entladen. Währenddessen wird der Strom aufintegriert. So kann zum einen die nutzbare Kapazität bestimmt und zum anderen die Modulspannung über die geflossene Ladung oder normiert über den SOC aufgetragen werden. Die Klemmenspannung unterscheidet sich allerdings von der Leerlaufspannung (OCV) um die Polarisationsüberspannung und Ohmsche Überspannung. Für hinreichend kleine Ströme werden diese Verluste (Überspannungen) sehr klein. Bei einer Mittelung der Klemmenspannen über einen Lade- und Entladehub kann dann die Ruhespannungskurve bestimmt werden. In der Literatur werden hierfür Ströme zwischen C/40 und C/10 genannt.

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein Strom von C/20 zum Laden und Entladen gewählt. Die Versuche wurden bei 0 °C, 10 °C, 20 °C, 30°C durchgeführt. Im Folgenden wird das Prozedere beispielhaft bei einer Temperatur von 20 °C beschrieben. Abb. 2-12 zeigt die Spannungsverläufe über der nutzbaren Kapazität für zwei Vollzyklen. Es ist zu erkennen, dass

die Spannungskurven des Ladens bzw. Entladens der beiden Vollzyklen übereinanderliegen. Das bedeutet die Messungen sind wiederholgenau.

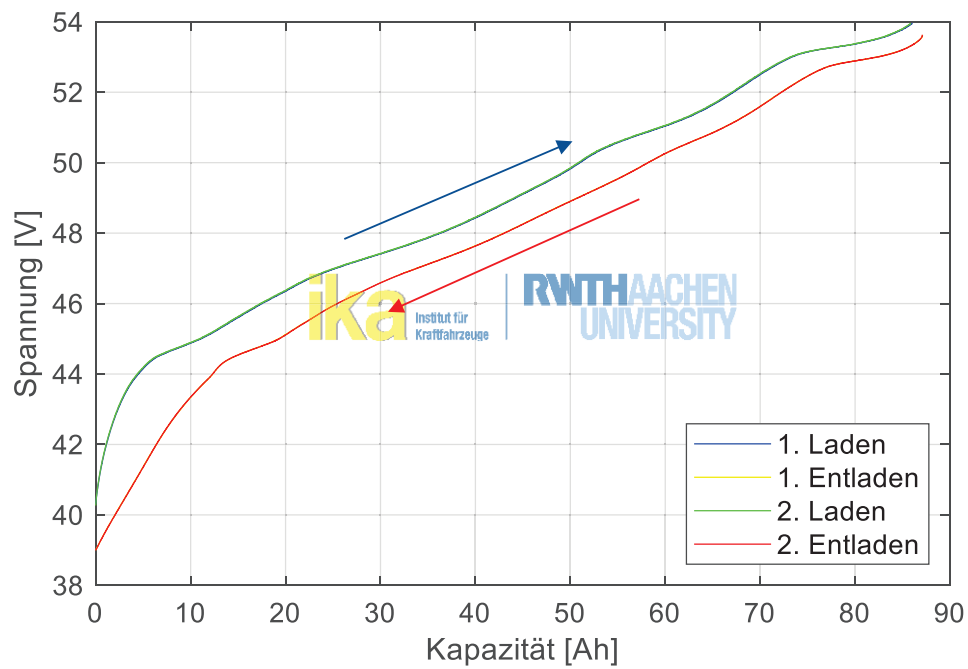


Abb. 2-12: Modulspanungsverlauf über der Kapazität von zwei Vollzyklen bei C/20 und 20 °C

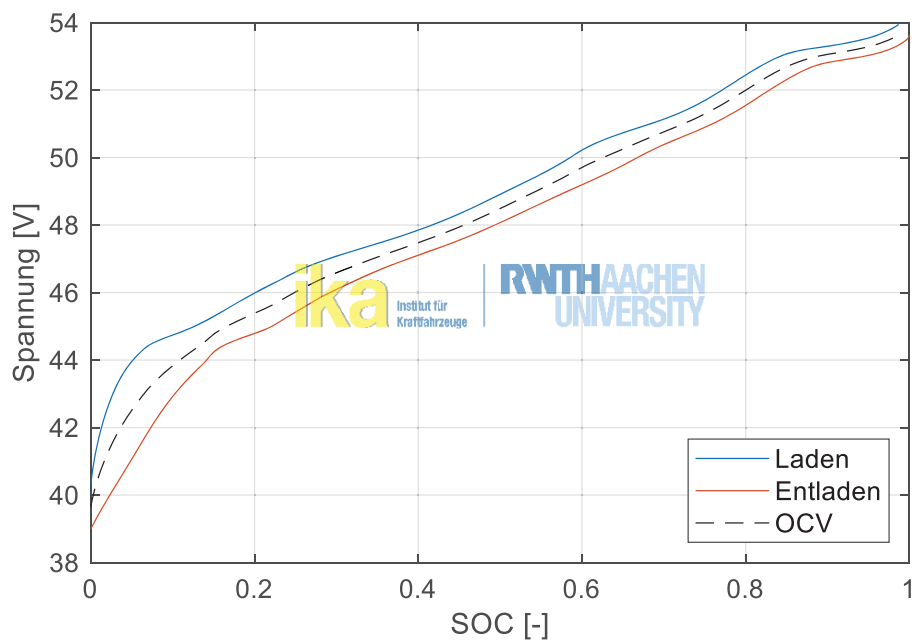


Abb. 2-13: Modulspannungen und OCV-Kurve über SOC bei 20 °C

Bei einer Temperatur von 20 °C liegt die nutzbare Kapazität bei 87,1 Ah. Eine Mittelung der Lade- und Entladespannungskurve über dem Ladegrad, auch State of Charge (SOC) genannt, ergibt die Ruhespannungskurve bzw. Open Circuit Voltage (OCV) Kurve, vgl. Abb. 2-13.

2.1.4.4 Pulse Testing (HPPC)

Zur Bestimmung der Ohmschen- und Polarisationswiderständen werden High Performance Pulse Charging Versuche durchgeführt. Das Modul wird im Rahmen dieser Versuche bei unterschiedlichen SOC mit hohen Lade- und Entladeströmen kurzzeitig belastet. Der Spannungs-, Strom- und Kapazitätsverlauf eines solchen Versuches, bei 20 °C, kann Abb. 2-14 entnommen werden.

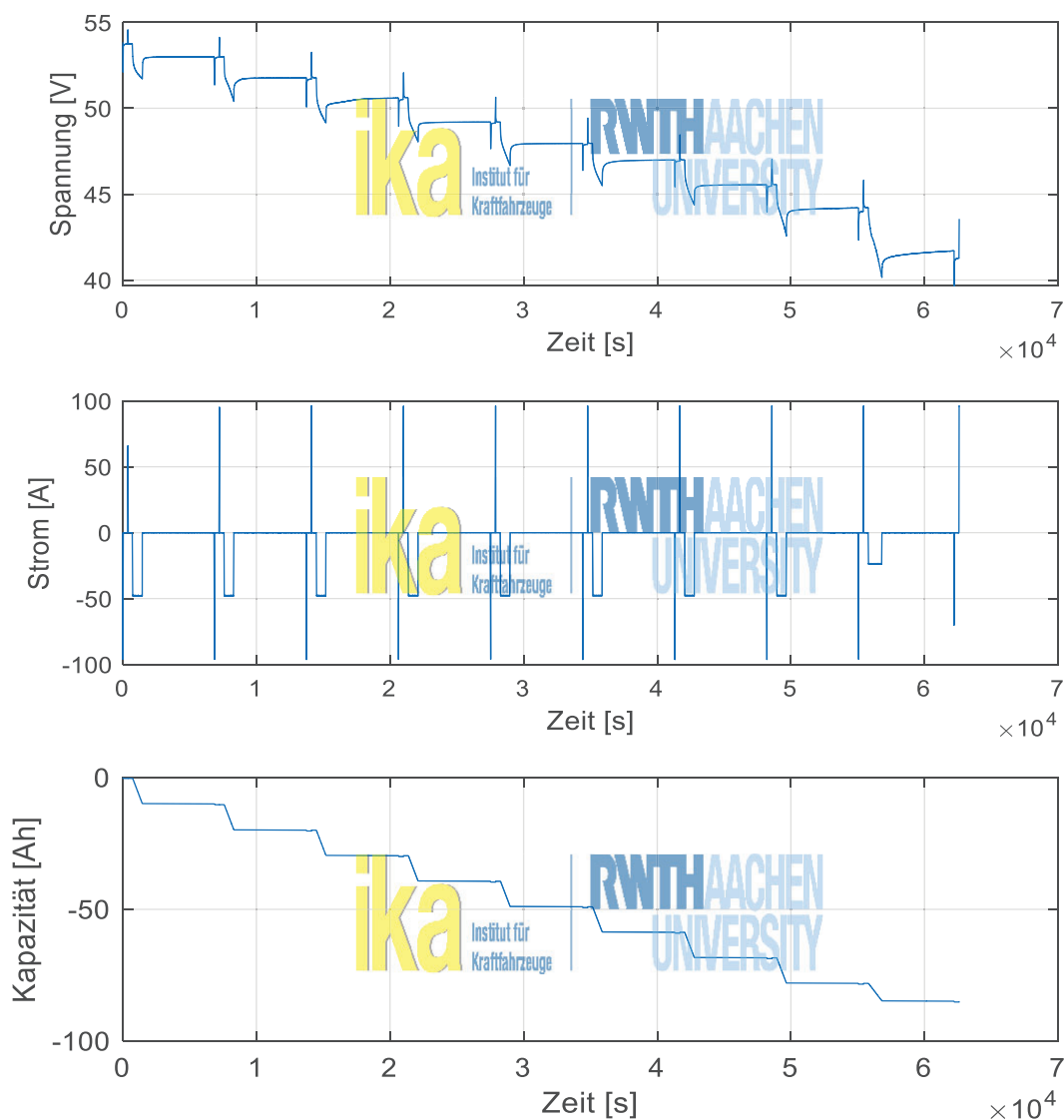


Abb. 2-14: Pulse Testing bei 20 °C

Die Über- und Unterspannungen (im Vergleich zum OCV) welche während eines Strompulses auftreten können durch einen ohmschen Widerstand R_0 und RC-Gliedern abgebildet werden.

Das Verfahren zur Bestimmung wird Pulse Fitting genannt. Eine genauere Beschreibung dieser Methoden findet sich bereits in vielen Veröffentlichungen, auf die an dieser Stelle verweisen wird [BRA19]. Um an dieser Stelle einen Einblick in die Vorgehensweisen zu gewähren wird auf die Bestimmung des R_0 -Glieds genauer eingegangen.

Der ohmsche Widerstand ist die Sprungantwort auf einen auftretenden Strom. Dieser ohmsche Widerstand R_0 ist abhängig von der Temperatur und dem SOC. Die Modultemperatur liegt während des gesamten Versuchs bei 20 °C. sodass der Innenwiderstand in diesem Versuch nur noch von dem SOC abhängt. Eine Vergrößerung des dritten Entladepulses kann der Abb. 2-15 entnommen werden.

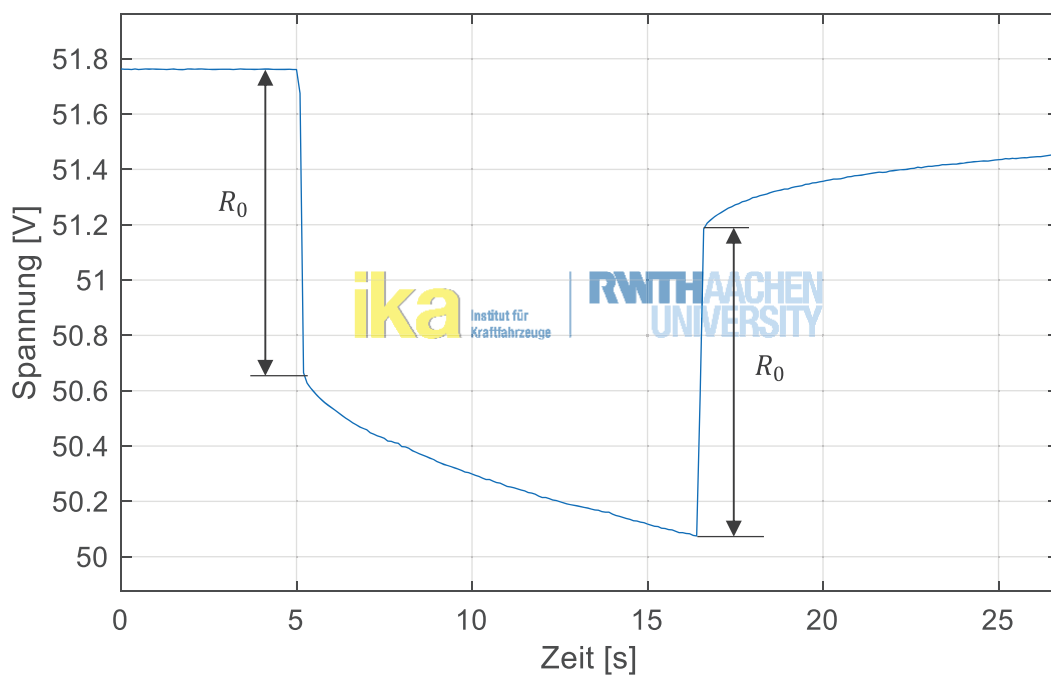
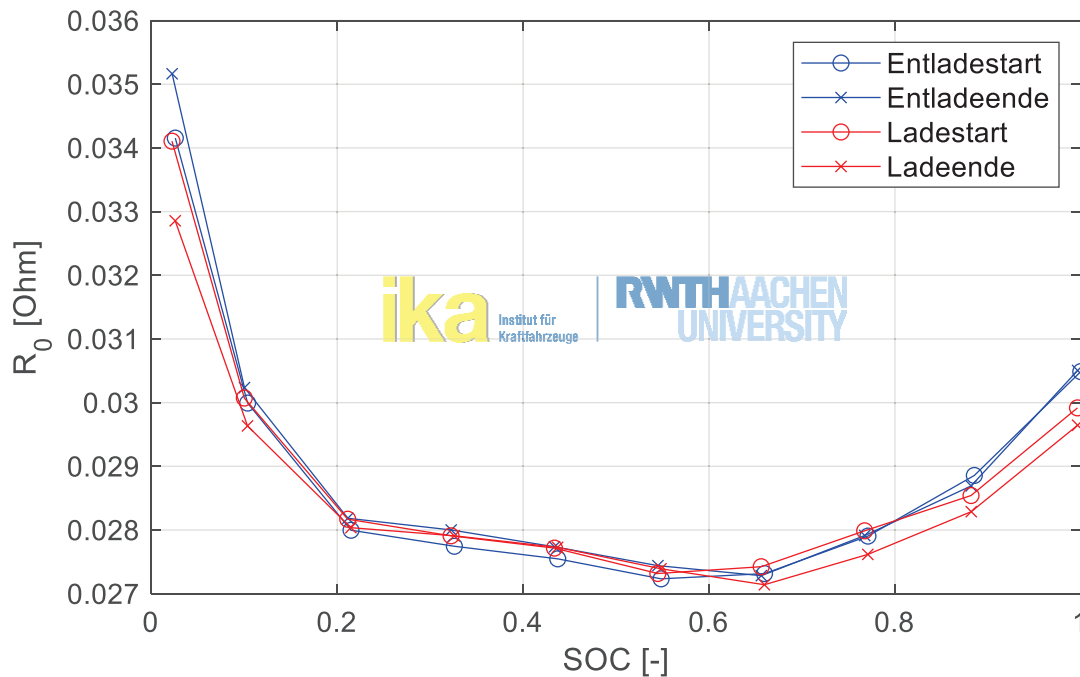


Abb. 2-15: Vergrößerung des dritten Entladepulses

Die zuvor beschriebenen Sprungantworten der Spannung auf einen auftretenden Strom kann für jeden Puls zweimal, nämlich am Anfang und am Ende, beobachtet werden. Dabei gilt es allerdings zu beachten, dass sich die Kapazität und somit auch der SOC am Anfang und Ende vom Puls, aufgrund des anliegenden Stromes, unterscheidet. Da die Pulse aber sehr kurz ausfallen kann die Änderung des SOC während des Pulses als vernachlässigbar angesehen werden. Bei zusätzlicher Betrachtung des Ladeimpulses kann demnach für ein SOC Niveau vier Mal der ohmsche Widerstand bestimmt werden. Die so ermittelten Werte zeigen eine gute Übereinstimmung wie Abb. 2-16 zeigt.

Abb. 2-16: Bestimmung der R_0 Werte bei 20 °C

2.1.4.5 Zyklustesting

Neben der Charakterisierung des Batteriemoduls wird das Modul auch mit charakteristische Lastzyklen belastet welche im Rahmen dieses Projektes erarbeitet wurden. In diesen Versuchen wird untersucht, ob das Modul für entsprechende Belastungen geeignet ist und ob es zu thermischen Limitationen kommt.

2.1.4.6 CTA-Zyklus

Im weiteren Versuchen ist das Batteriemodul bei verschiedenen Umgebungstemperaturen mit dem CTA-Zyklus belastet worden. Abb. 2-17 zeigt den gemessenen Leistungsverlauf und die Temperatursignale der auf den Batteriezellen platzierten Temperatursensoren bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C. Der eigentliche Fahrzyklus ist 264 Minuten lang. Daran schließt sich der Ladevorgang mit dem maximal zugelassenen kontinuierlichen Ladestrom von 70 A an.

2.1.4.7 Anderen Anwendungsfälle

Es wurden auch Belastungsversuche für die anderen Anwendungsfälle MHK elektrisch., MHK hybrid und RTG hybrid durchgeführt. Hierfür wurde das Batteriemodul mit den verschiedenen Belastungsprofilen bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen belastet.

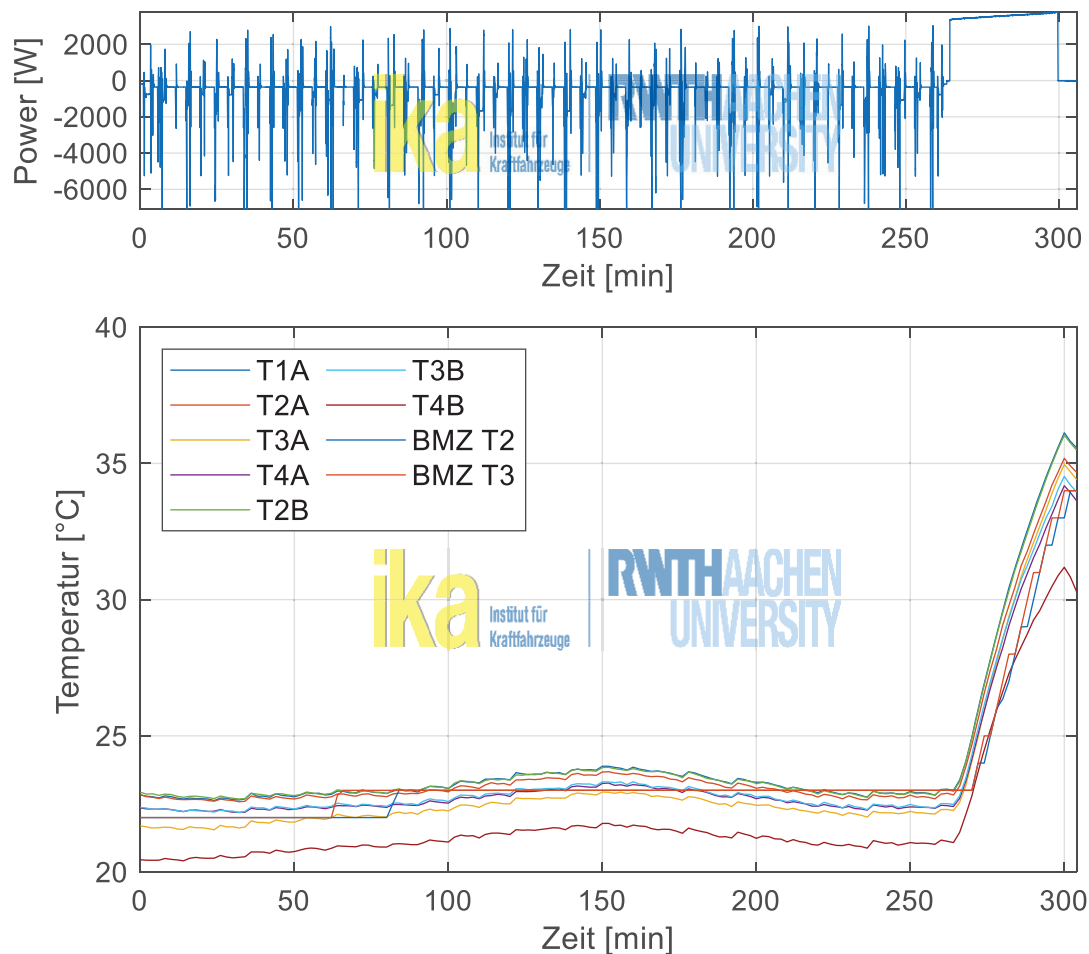


Abb. 2-17: Leistungs- und Temperaturverlauf des CTA-Zyklus bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C

2.1.5 Arbeitspaket 4.1 – Simulation Fahrzeug

Im Folgenden wird die Erstellung und Parametrierung des verwendeten Triebstrangsimulationsmodells vorgestellt. Diese Simulation wird in MATLAB Simulink durchgeführt und basiert auf der Simulationsbibliothek des ika. Das erstellte Modell fußt auf dem generischen Modell eines batterieelektrischen Fahrzeugs.

2.1.5.1 Erstellung der Triebstrangmodelle

Im Rahmen des Projekts werden durch das ika zwei Fahrzeuge in einer Triebstrangsimulation abgebildet. Der Fokus liegt zunächst auf der Erstellung eines Modells des batterieelektrischen Terminal Tractors. Da im Verlauf des Projekts der Einbau des entwickelten Moduls in einem Automated Guided Vehicle (kurz AGV) zur Debatte steht, wird auch dieses Fahrzeug simulativ abgebildet.

2.1.5.2 Anwendungsfall Terminal Tractor

Da sich der innerbetriebliche Betrieb eines elektrifizierten Nutzfahrzeuges teils deutlich von einem gewöhnlichen batterieelektrischen Personenkraftwagen unterscheidet, sind einige Anpassungen des Modells notwendig. Zunächst ist es wichtig, dass eine zeitliche Veränderung der Fahrzeugmasse, welche in die Berechnungen des Modells einfließt, möglich ist. Dies ist notwendig, um das Zu- und Abladen von Containern simulativ abbilden zu können. Diese Änderung der Zuladungsmasse kann in keinem Fall vernachlässigt werden, da bei einem angenommenen Fahrzeugeigengewicht von 12,3 t, einer Chassismasse von 8 t und einer maximal zulässigen Containermasse von etwa 32 t der Anteil der Zuladung bis zu 76 % der Gesamtmasse des Gespanns betragen kann.

Weiterhin ist es erforderlich, dass die Möglichkeit zur zeitlichen Änderung der Nebenverbraucherleistung gegeben ist. Dies ist notwendig, um Effekte abbilden zu können, die im PKW nicht auftreten bzw. eine untergeordnete Rolle spielen. Hierzu gehört etwa die fahrzeuginterne Hydraulik für die Lenkung und die Hebeeinrichtung der Sattelplatte, der Kompressor für die Bereitstellung von Druckluft für das Bremssystem und die Heizung bzw. Klimatisierung der Fahrerkabine. Im Modell wird dies durch ein zeitabhängiges Nebenverbraucherleistungssignal realisiert, welches zur bereits vorhandenen durchschnittlichen Nebenverbraucherleistung addiert wird. Es wird dieser Ansatz zur Darstellung der vorher genannten Effekte gewählt, da zwar bekannt ist, welche Komponenten für die erwähnten Funktionen verbaut sind, jedoch nicht, wie sich diese in den unterschiedlichen Fahrzuständen verhalten. Eine technisch detaillierte Modellierung der Einzelkomponenten wird an dieser Stelle nicht durchgeführt.

Im Ausgangszustand des Simulationsmodells ist kein Ladegerät vorgesehen. Für diese Simulationsumgebung ist dies jedoch notwendig, da dies für den Betriebsablauf des Systems Terminal Truck eine wichtige Rolle spielt und abgebildet werden muss. Das erstellte Modell eines generischen Ladegerätes arbeitet mit einer konstanten Ladeleistung. Eingabe für das Ladegerät ist ein zeitvariables Ladeleistungssignal. Aus dieser gewünschten Ladeleistung wird mittels der aktuellen Batteriespannung der Strom errechnet, mit dem die Batterie geladen wird. Dieses Modell berücksichtigt zwei Betriebsgrenzen der Batterie. Zum einen wird überprüft, ob die aktuell gewünschte Ladeleistung im Rahmen der Leistungsfähigkeit der Batterie liegt. Hierzu wird die gewünschte Ladeleistung mit der im Modell hinterlegten maximal möglichen Ladeleistung bei aktuellem Ladegrad verglichen und bei einer Überschreitung auf den maximal möglichen Wert heruntersgesetzt, welche die Batterie noch zu leisten im Stande ist. Weiterhin wird der Ladegrad der Batterie überwacht. Erlaubte Werte für diesen liegen in der Simulation zwischen 0 und 1. Ist im Ladevorgang ein Ladegrad von 1 erreicht, wird der Strom vom Ladegerät in die Batterie zu 0 gesetzt. Zusätzlich ist im Modell des Ladegerätes ein durchschnittlicher Wirkungsgrad hinterlegt.

2.1.5.3 Parametrierung des Modells

Auf der Grundlage der Bereitstellung von Daten durch Konecranes wird im Folgenden ein erster Parametersatz für die Triebstrangsimulation erstellt. Grundlage hierfür sind zunächst die Daten des Prototyps eines batterieelektrischen Terminal Trucks aus dem Vorgängerprojekt „Batterie-elektrischer Terminal Truck im Feldversuch“. Die Daten und Kennfelder für die Batterie auf Systemebene werden aus dem im Projekt ausgewählten Batteriekonzepts sowie aus den Datenblättern der verwendeten Zellen und den Ergebnissen der am ika durchgeführten Prüfstandsversuche am durch BMZ aufgebauten Batteriemoduls entnommen. In der folgenden Tabelle ist ein Teil des verwendeten Parametersatzes dargestellt.

| PARAMETER | WERT | BESCHREIBUNG |
|----------------------|---------|------------------------------------|
| m_{Ges} | 12,3 t | Fahrzeugmasse |
| $c_w \cdot A$ | 0 | Luftwiderstand |
| i_{Ges} | 16,2 | Achsübersetzung |
| η_{Achs} | 0,92 | Achswirkungsgrad |
| P_{aux} | 5,1 kW | Konstante Nebenverbraucherleistung |
| U_{nom} | 720 V | Nominale Batteriespannung |
| C_{Batt} | 140 kWh | Batteriekapazität |

Abb. 2-18: Parametersatz des Triebstrangmodells

Dieser Parametersatz stellt die Kennwerte da, die im Vorgängerprojekt für den Prototyp des batterieelektrischen Terminal Trucks verwendet wurden. Die Vernachlässigung des Luftwiderstandes wird damit begründet, dass der Anteil des Luftwiderstandes am gesamten Fahrwiderstand aufgrund der niedrigen Fahrgeschwindigkeiten zu vernachlässigen ist.

Die elektrische Maschine des Fahrzeugs wird für die Simulation ebenfalls aus dem Vorgängerprojekt übernommen. Die Implementierung dieser Maschine im Modell wird über die Skalierung einer generischen permanenterregten Synchronmaschine aus der Simulationsbibliothek realisiert. Ziel der Skalierung ist es, das Überlastdrehmoment und die Eckdrehzahl der Maschine möglichst genau abzubilden. Da im Datenblatt der elektrischen Maschine des Prototyps lediglich ein Gesamtwirkungsgrad gegeben ist, wird das Wirkungsgradkennfeld der generischen Maschine auf diesen skaliert und ansonsten unverändert beibehalten.

Für die Reifen des Fahrzeuges wird ein passendes Beispiel aus dem Katalog der Firma Continental herangezogen, da genaue Angaben zum verwendeten Reifen nicht verfügbar sind. Für diesen Reifen wird das EU-Reifenlabel herangezogen. Aus diesem wird mit einem Skript aus der Simulationsbibliothek anhand der Reifenklasse und der Einstufung in eine Energieeffizienzklasse der Rollreibungsbeiwert bestimmt und der dynamische Radhalbmesser aus der Reifendimension berechnet. Diese sind in der nächsten Tabelle dargestellt.

| PARAMETER | WERT | BESCHREIBUNG |
|-----------|----------|---------------------------|
| f_R | 0,0080 | Rollreibungsbeiwert |
| r_{dyn} | 0.52175m | Dynamischer Radhalbmesser |

Abb. 2-19: Verwendete Reifenparameter

Für die restlichen Parameter der Simulation, die notwendig, aber nicht von größerem Belang sind, werden entweder generische Werte aus Elementen der Simulationsbibliothek übernommen oder, basierend auf diesen, eigene Schätzwerte angenommen.

2.1.5.4 Validierung des Modells

Nachfolgend werden die Ergebnisse des Triebstrangmodells des Terminal Tractors anhand der durch Konecranes zur Verfügung gestellten Daten validiert. Hierzu werden im Speziellen die gemessenen Leistungen und Geschwindigkeitsverläufe aus den Messdaten mit den Ergebnissen der Simulation verglichen. Da für die vermessenen Fahrten anhand des Signals der Sattelplatte lediglich bekannt ist, ob eine Zuladungsmasse vorhanden ist, nicht jedoch der Betrag dieser, werden zur Validierung der Triebstrangsimulation nur die Zyklen verwendet, bei denen die Sattelplatte geöffnet ist. Die Zuladung liegt in diesen Fällen bei 0 t. Durch diese Sortierung der verwendeten Messdaten reduziert sich die Anzahl der verwendbaren Einzelfahrten auf 155. In der unten dargestellten Grafik ist beispielhaft ein Vergleich der Leistungsverläufe eines Zyklus dargestellt.

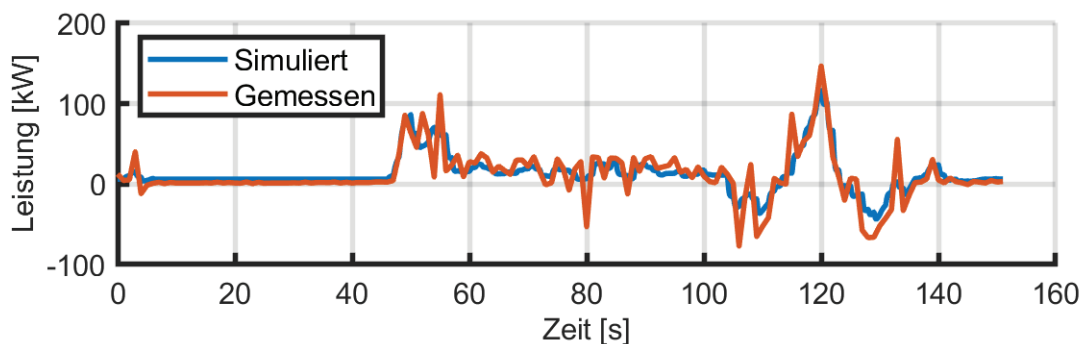


Abb. 2-20: Leistungsverlauf für eine Einzelfahrt des Terminal Tractors

Aus dieser Darstellung lässt sich ableiten, dass der Leistungsbedarf des Fahrzeugs durch das Modell gut abgebildet wird. In der folgenden Grafik sind die Streuung des relativen Fehlers sowie der relative Fehler im Energiebedarf dargestellt.

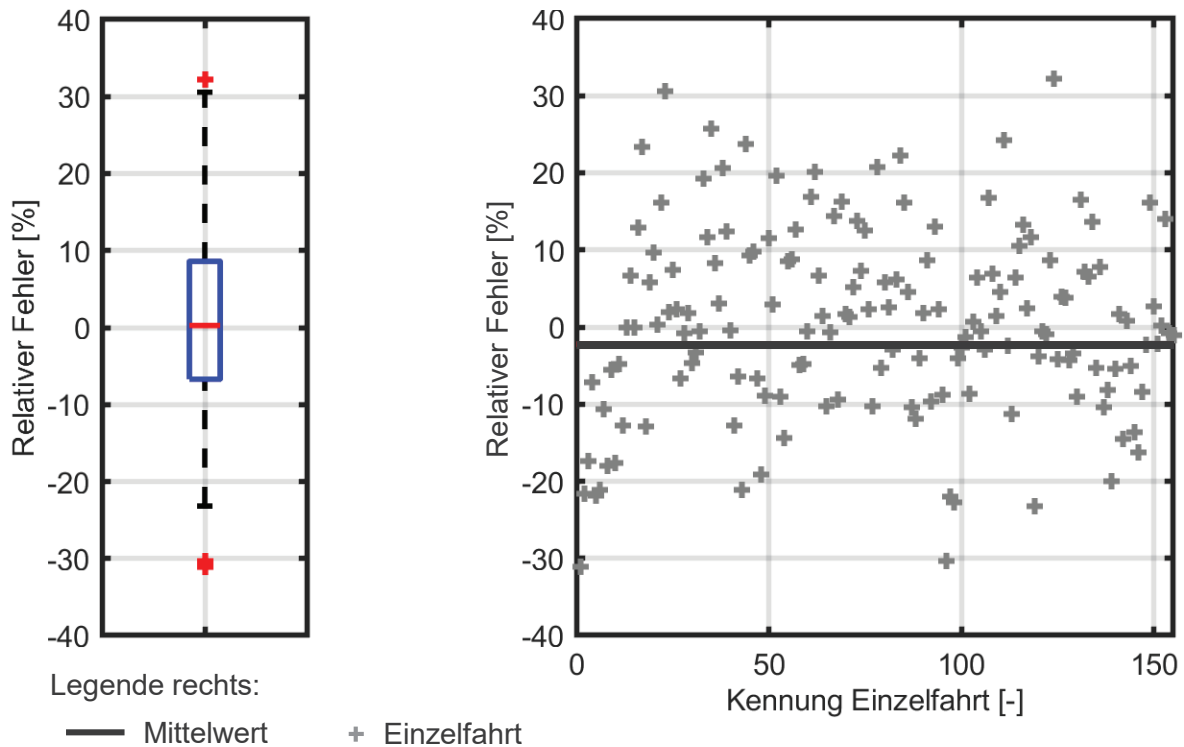


Abb. 2-21: Fehlerdarstellung der Triebstrangsimulation

Wie in der obenstehenden Abbildung zu erkennen ist, liegt der Fehler im Mittel nahezu bei 0 %. Der Grund für die hohe Streuung liegt vermutlich in der einfachen Abbildung der Nebenverbraucher in der Simulation. Gemäß der Angabe des Herstellers des Prototyps liegt die durchschnittliche Batterieleistung im Fahrbetrieb während der Erprobung am CTA bei etwa 20 kW. Hier ist zur Präzisierung des Ergebnisses eine detaillierte Abbildung der Nebenverbraucher notwendig. Aufgrund der Datenlage ist dies jedoch nicht möglich und wird nicht durchgeführt. Eine weitere mögliche Fehlerquelle stellt die niedrige Aufzeichnungsfrequenz der Messdaten von 1 Hz und die damit notwendige Glättung des Geschwindigkeitssignals dar. Zudem liegt in den Messdaten keine Information über die durch das Fahrzeug befahrene Steigung vor. Es ist jedoch anzumerken, dass dies nur einen geringen Einfluss hat, da durch den eigenen Eindruck und die Aussagen der Mitarbeiter des CTA am Hafen keine wesentlichen Steigungen zu erkennen sind.

2.1.5.5 Anwendungsfall Automated Guided Vehicle

Das Modell des batterieelektrischen Automated Guided Vehicle (im Folgenden mit AGV abgekürzt) wird ebenfalls basierend auf der Simulationsbibliothek des ika aufgebaut. Aufgrund der Verfügbarkeit der Daten eines Lift-AGV und der damit verbundenen Möglichkeit der Validierung wird das Modell zunächst für diesen Anwendungsfall erstellt. Für weitere Verwendung im Rahmen der in Kapitel 2.1.6.5 vorgestellten Flotten- und Logistiksimulation wird der zusätzliche Energiebedarf der Nebenverbraucher, speziell der Hydraulik, wieder herausgerechnet. Weiterhin wird auch dieses Modell um eine Schnittstelle zur Ladeinfrastruktur erweitert. Diese wird, analog zum Modell des Terminal Tractors, durch die

Vorgabe eines Ladeleistungssignals im Modell realisiert. Für die Parametrierung der Batterie im Modell werden auch hier das ausgewählte Batteriekonzept, die Datenblätter der Zellen sowie die Ergebnisse der Batterietests herangezogen. Die Überwachung der Leistungsgrenzen erfolgt ebenfalls analog.

Analog zur Erstellung des Modells der Terminal Tractors wird hier auf Daten der Firma Konecranes zurückgegriffen. Besonderes Augenmerk bei der Erstellung dieses Modells liegt hier auf der Darstellung der Nebenverbraucher des Fahrzeugs, da dieses die Hydraulik bei längeren Stillstandszeiten vollständig abschaltet und somit der Ansatz der als konstant angenommenen Nebenverbraucherleistung nicht valide ist.

In der folgenden Abbildung sind die Kennwerte der Validierung des Modells für den vorhandenen 24h-Datensatz dargestellt.

| | DISTANZ | ENERGIEBEDARF |
|------------------------------|-----------|---------------|
| Gesamtwert Messung | 61,937 km | 271,37 kWh |
| Gesamtwert Simulation | 61,965 km | 272,10 kWh |
| Absoluter Fehler | 28 m | 0,73 kWh |
| Relativer Fehler | 0,044 % | 0,27 % |

Abb. 2-22: Absolute und Relative Fehler des AGV-Triebstrangmodells

Der kleine relative Fehler in der gefahrenen Distanz zeigt, dass das Modell dem vorgegebenen Geschwindigkeitsverlauf sehr gut folgen kann. Auch der Energiefehler ist klein und somit kann das Modell weiterhin als eine valide simulative Abbildung des realen AGVs, von dem die Messwerte stammen, betrachtet werden. Im Folgenden ist beispielhaft der Leistungsverlauf für eine Einzelfahrt des AGVs dargestellt.

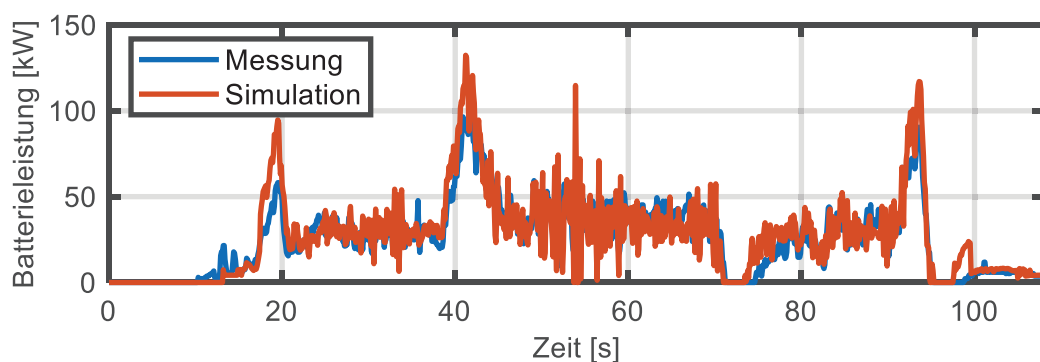


Abb. 2-23: Leistungsverlauf für eine Einzelfahrt des AGVs

Wie zu erkennen ist wird auch hier der Leistungsbedarf des Fahrzeugs gut abgebildet. Zwar ist der Leistungsbedarf des Modells in den Beschleunigungsphasen leicht zu hoch, im Mittel wird dieser jedoch gut abgebildet.

2.1.5.6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Arbeitspakets können für die Anwendungsfälle Terminal Tractor sowie Automated Guided Vehicle auf Basis der zur Verfügung gestellten Daten jeweils performante und validierte Simulationsmodelle erstellt werden. Besonderes Augenmerk bei der Erstellung wird in beiden Fällen zum einen auf die detaillierte Abbildung der als relevant identifizierten Nebenverbraucher sowie der Darstellung eines Ladegeräts zur Anbindung an die Ladeinfrastruktur gelegt. Die Modelle sind im Stande, unter Vorgabe eines Geschwindigkeits- sowie Ladeleistungsprofils, detaillierte und realitätsnahe Daten zum Energiebedarf des Fahrzeugs zur Verfügung zu stellen. Weiterhin sind diese wichtige Bestandteile zur Bewertung des in AP1.1 entwickelten Referenzzyklus sowie zur Durchführung der in AP4.2 erstellten Flotten- und Logistiksimulation.

2.1.6 Arbeitspaket 4.2 – Simulation Ladevorgang

Zur Abbildung der im Projekt betrachteten Anwendungsfälle wird eine maßgeschneiderte Simulationsumgebung aufgebaut. Diese setzt sich im Wesentlichen aus drei Teilbereichen bzw. dem in der Abbildung unten dargestellten Ablauf zusammen.

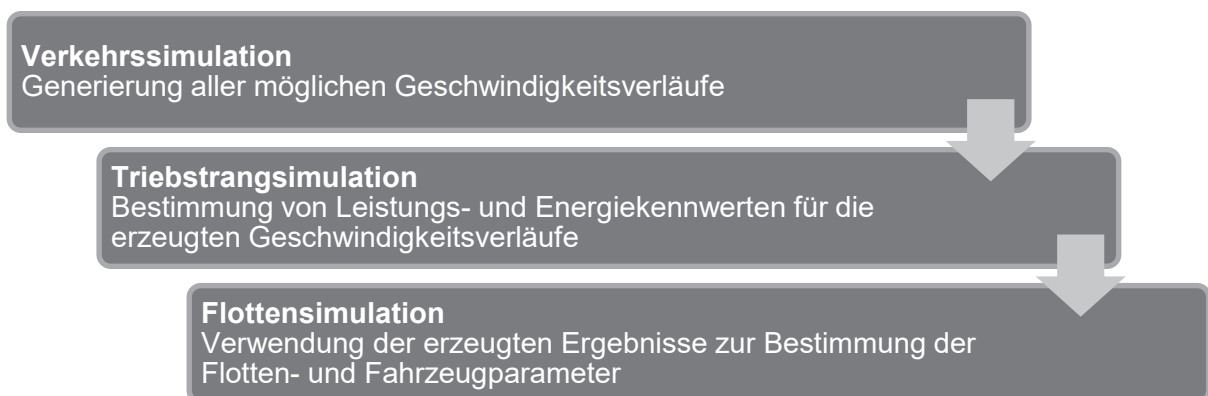


Abb. 2-24: Allgemeiner Ablauf des Simulationskonzeptes

Die Triebstrangsimulationsmodelle unter Punkt 2 werden im Arbeitspaket 4.1 aufgebaut. Im Rahmen des Arbeitspakets 4.2 werden die Umfeldsimulationsumgebungen für die Anwendungsfälle Container Terminal Altenwerder – Terminal Tractor (im Folgenden kurz CTA-TT), Düsseldorfer Container Hafen (DCH) und Container Terminal Altenwerder – Automated Guided Vehicle (CTA-AGV) erstellt. Weiterhin wird die Methodik sowie die Implementierung der Flotten- und Logistiksimulation in diesem Arbeitspaket bearbeitet.

2.1.6.1 Aufbau der Umfeldsimulationsumgebungen

Grundkonzept für alle betrachteten Anwendungsfälle ist zunächst die eingehende Analyse des Anwendungsfalles in Kooperation mit dem Betreiber. Hierbei stehen der allgemeine Betriebsablauf, die relevanten Randbedingungen sowie für die für die simulative Abbildung zu treffende Annahmen im Fokus.

Für die Abbildung der geometrischen Bedingungen innerhalb der betrachteten Anwendungsfälle wird die Software SUMO (kurz für „Simulation of Urban Mobility“) verwendet. Hierbei handelt es sich um eine mikroskopische Verkehrssimulation, die sich besonders für die Abbildung einzelner Fahrzeuge und deren Bewegungsprofile eignet. Im Anschluss an Erstellung erfolgt die Vorsimulation aller möglichen Fahrprofile, die für den Einsatz des Fahrzeuges relevant sind. Hierdurch entsteht zwar im Vorfeld ein größerer Simulationsaufwand, jedoch können die Ergebnisse im weiteren Verlauf der im Rahmen des Projekts aufgebauten Simulationsumgebung äußerst effizient eingesetzt werden.

2.1.6.2 CTA-TT

Die grundsätzliche Implementierung des Hafens wird über einen Import von OpenStreetMap Daten (im Folgenden als OSM-Daten bezeichnet) des Bereichs im und um den Hafen realisiert. Vorteil dieses Imports aus den OSM-Daten ist, dass ein Großteil der Fahrwege inklusive Fahrrichtungen und Kreuzungen im Hafenbereich bereits implementiert sind. Zum anderen findet mit dem Import dieser Daten bereits eine Kalibrierung der Netzkoordinaten auf die äquivalenten GPS-Positionen statt. Jeder Position im Netz kann jetzt also eindeutig eine GPS-Koordinate zugewiesen werden. Dies bietet den enormen Vorteil, dass im weiteren Verlauf die Validierung der Positionsverläufe der Fahrten anhand der Messdaten validiert werden kann.

Die erzeugte Netzdatei wird im folgenden Schritt bereinigt. Dies ist notwendig, da ein Großteil der importierten Daten für das System Terminal Truck irrelevant sind. Hierzu zählen die umliegenden öffentlichen Straßen, jedoch auch einige wenige Teilbereiche des Hafens. Nach der erfolgten Bereinigung wird das Netz um die Positionen und Strecken erweitert, die nicht in den OSM-Daten vorhanden sind. In der folgenden Abbildung ist das CTA schematisch dargestellt. Der für den Terminal Tractor relevante Hinterlandbereich des Hafens ist mit einer grünen Umrandung markiert, der Parkplatz der Fahrzeuge ist rot markiert.

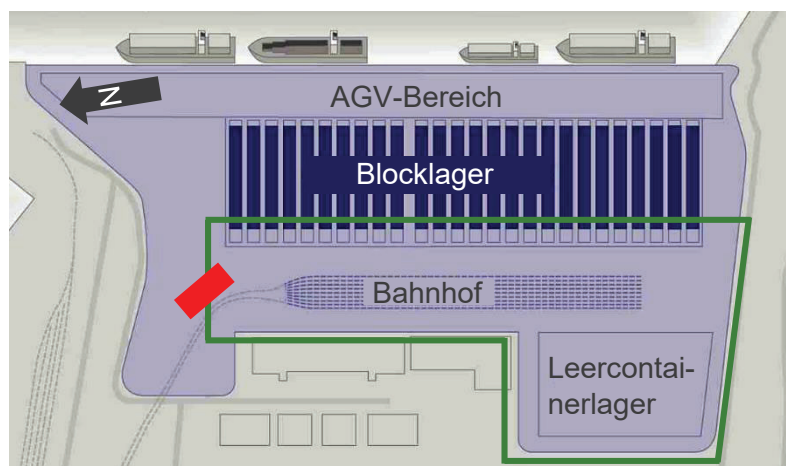


Abb. 2-25: Schematische Darstellung des CTA [CTA17]

Für den Terminal Tractor ergeben sich vier relevante Bereiche: die Verladepositionen am Blocklager, die Verladepositionen am Bahnhof, das Leercontainerlager sowie der Parkplatz.

Nach Rücksprache mit dem Betreiber ist der Aufbau der Ladetechnik für die Fahrzeuge am Parkplatz am sinnvollsten und wird daher auch so in der Simulation implementiert.

Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass das Fahrzeug eine von der Zuladungsmasse abhängige Längsbeschleunigung aufweist, wird für den Terminal Tractor in Absprache mit den Projektpartnern die Anforderung definiert, dass das Fahrzeug ohne Zuladung mit $2,0 \text{ m/s}^2$ sowie mit voller Zuladung mit $0,5 \text{ m/s}^2$ beschleunigen können muss. In der Simulation wird diese Anforderung in insgesamt 5 Stützstellen der Beschleunigung für äquidistante angenommene Zuladungen abgebildet.

Die Simulation wird als Reihensimulation aller möglichen Verbindungen der insgesamt 94 implementierten Positionen im Netz durchgeführt. Dies resultiert in insgesamt 8742 möglichen Routen sowie unter Einbeziehung der oben genannten Stützstellen den dazugehörigen 43.710 Geschwindigkeitsverläufen für den Anwendungsfall CTA-TT.

Validiert werden diese Verläufe basierend auf den von Konecranes zur Verfügung gestellten Messdaten. Die Validierung der Ergebnisse wird anhand eines Vergleichs der Positionsverläufe, der Geschwindigkeitsverläufe sowie der insgesamt gefahrenen Strecke je Route durchgeführt. In der folgenden Abbildung ist beispielhaft ein Vergleich der Positionsverläufe dargestellt.

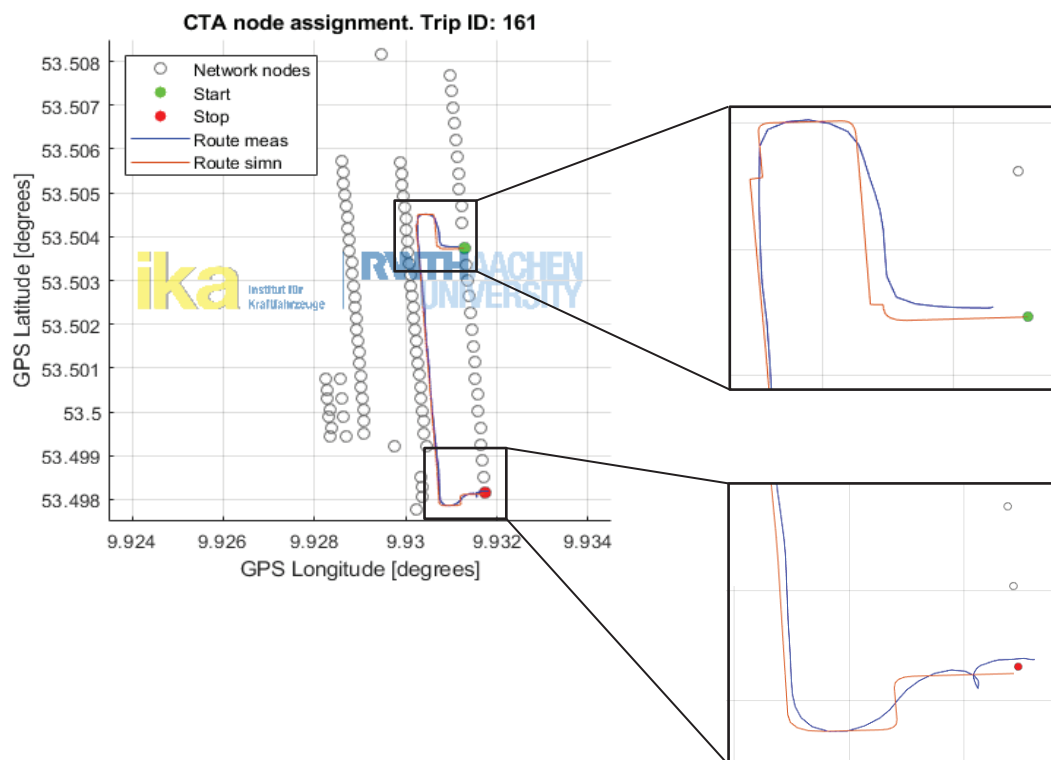


Abb. 2-26: Vergleich der gemessenen und simulierten Positionsverläufe für eine Einzelfahrt

In der Abbildung ist in orange der simulierte Positionsverlauf sowie in blau der gemessene Positionsverlauf abgebildet. Es ist zu erkennen, dass der allgemeine Verlauf gut abgebildet wird. Aufgrund der Limitierung durch die Möglichkeiten der verwendeten Software ergeben sich jedoch Abweichungen durch teils zu geringe Kurvenradien sowie der Vernachlässigung

des Wendemanövers der Fahrzeuge an den Verladepositionen. In Summe kann der gewählte Ansatz hier als validiert bezeichnet werden. Das Verhalten der Fahrzeuge bzw. Fahrer im Hinterlandbereich wird realitätsnah abgebildet und die Ergebnisse der Simulation können für die weitere Betrachtung und Analyse des Anwendungsfalls verwendet werden.

Die generierten Geschwindigkeitsverläufe werden mit der jeweiligen Information über die Zuladungsmasse anschließend in das Triebstrangmodell gespeist. Dadurch wird zu jeder Route der Energiebedarf generiert zusammen mit den Ergebnissen der Umfeldsimulation in einem Datensatz zur weiteren Verwendung in der Flotten- und Logistiksimulation abgelegt.

2.1.6.3 DCH-TT

Im Folgenden wird der Aufbau der Umfeldsimulation für den Düsseldorfer Container Hafen (DCH) beschrieben. Das Vorgehen erfolgt analog zum vorher beschriebenen Anwendungsfall. In Zusammenarbeit mit dem Hafenbetreiber werden zunächst die relevanten Positionen im Hafen und dessen direktem Umfeld definiert. In diesem Fall werden vom Terminal Tractor neben dem Hafen selbst zwei Firmen im direkten Umfeld bedient. Dies wird mit den vorherrschenden Gegebenheiten im öffentlichen Straßenverkehr sowie den Besonderheiten im Hafen selbst in der Simulation abgebildet. In der folgenden Abbildung ist das erstellte Netzwerk dargestellt.

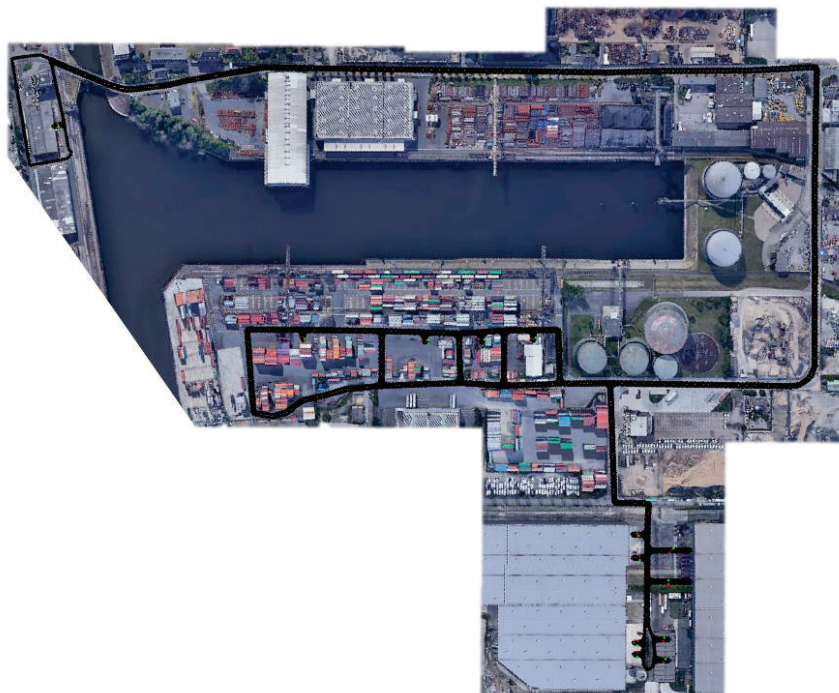


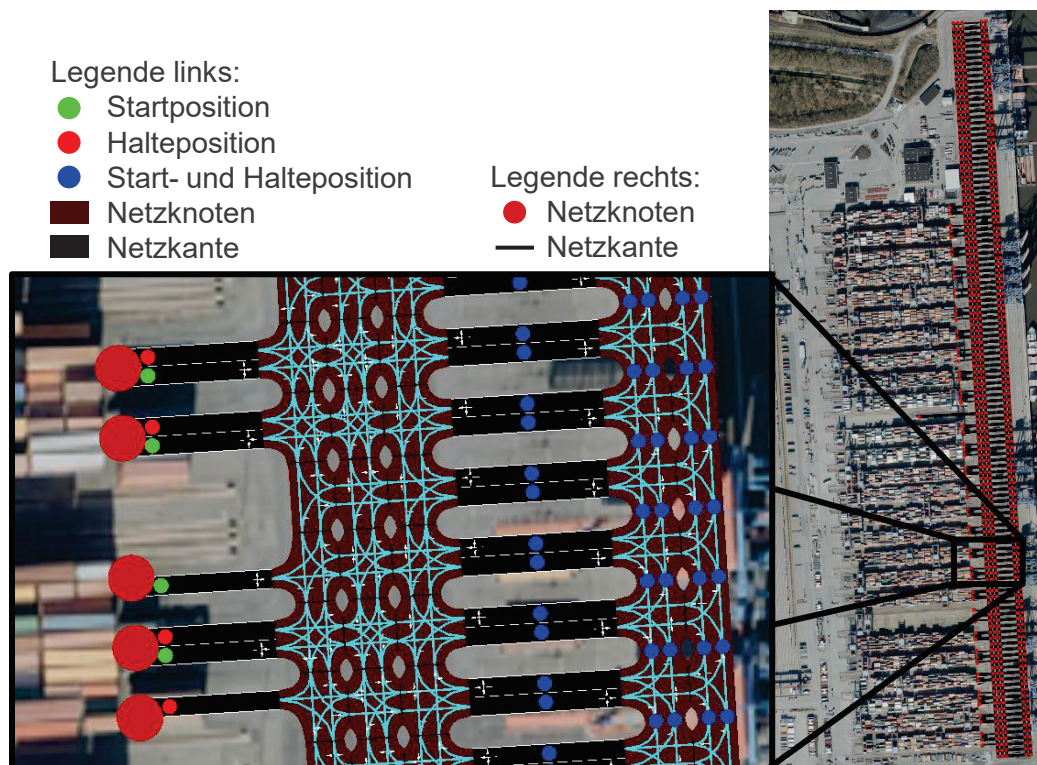
Abb. 2-27: Netzwerk der Umfeldsimulation des Düsseldorfer Container Hafens

Zur weiteren Detaillierung der Simulation werden am DCH Messfahrten durchgeführt und der GPS- sowie Geschwindigkeitsverlauf aufgezeichnet. Die Erkenntnisse aus diesen Daten fließen in die Erstellung des Netzwerks und dessen Parametrierung mit ein. Da keine weiteren

Datensätze vorliegen, kann an dieser Stelle keine Validierung der simulativ generierten Daten durchgeführt werden. Trotzdem kann aufgrund der Messungen davon ausgegangen werden, dass auch diese Umgebung realitätsnahe Daten generiert. Basierend auf diesen Ergebnissen wird mithilfe des Triebstrangmodells auch hier ein Datensatz erzeugt, der Aufschluss über den Energiebedarf des Fahrzeugs gibt.

2.1.6.4 CTA-AGV

Da im Projektverlauf die Möglichkeit bestand, dass ein in diesem Projekt entwickeltes Batteriesystem in einem AGV erprobt wird, wird auch dieser Anwendungsfall in vollem Umfang in der Simulationsumgebung abgebildet. Dieser birgt aufgrund der Autonomie der Fahrzeuge sowie des deutlich größeren Umfangs des Systems neue Herausforderungen, wobei auch hier die Erstellung analog zu den vorher beschriebenen Anwendungsfällen erfolgt. Zunächst ist festzuhalten, dass das Fahrverhalten wesentlich einfacherer simulativ abzubilden, da hier kein menschlicher Fahrer mehr abgebildet werden muss, sondern lediglich die Parametrierung des Fahrreglers der Fahrzeuge in das Fahrermodell von SUMO überführt werden muss. Die Abbildung der geometrischen Randbedingungen des Systems ist jedoch wesentlich komplexer als bei den vorher beschriebenen Anwendungsfällen, da hier die Anzahl der Fahrspuren und



möglichen Halte-, Warte- und Verladepositionen deutlich größer ist. In der folgenden Abbildung ist ein Ausschnitt des Simulationsnetzwerks dargestellt.

Abb. 2-28: Ausschnitt aus dem Simulationsnetzwerk CTA-AGV

Wie in der Abbildung zu erkennen, ist das Netz zwar sehr umfangreich, jedoch auch in weiten Teilen symmetrisch. Daher kann aufgrund der Gleichheit eines relevanten Anteils aller Routen die Anzahl der absolut zu simulierenden Routen deutlich reduziert werden. Anhand der vorliegenden Messdaten eines AGV und der Identifikation der in diesen Daten enthaltenen Einzelrouten wird eine Validierung der Simulationsergebnisse durchgeführt. Ein Vergleich einer Einzelfahrt ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

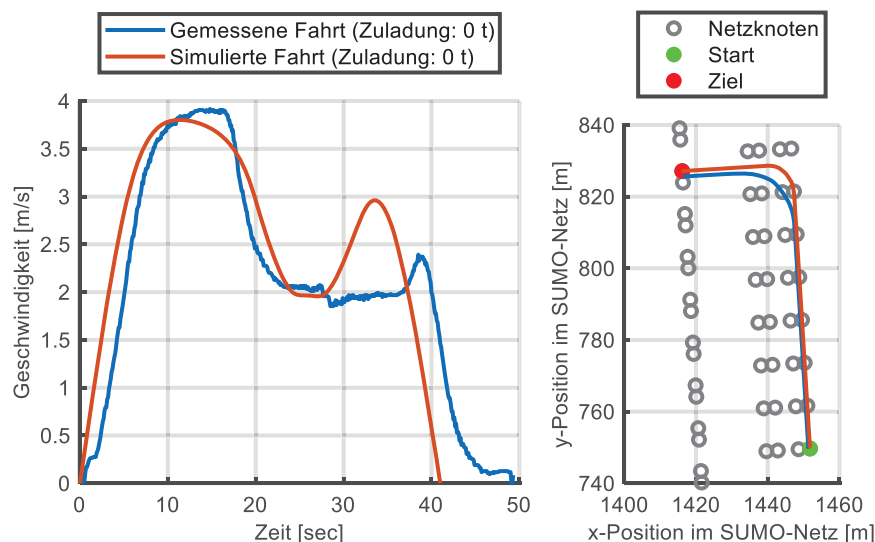


Abb. 2-29: Vergleich der gemessenen und simulierten Positionsverläufe für eine Einzelfahrt

Wie in der Abbildung zu erkennen werden sowohl der Geschwindigkeits- als auch der Positionsverlauf im Wesentlichen gut abgebildet. Ähnlich zur Validierung der CTA-TT Umgebung ist auch hier zu bemerken, dass der Fehler in der mittleren in der Simulation gefahrenen Geschwindigkeit im Mittel gut getroffen, jedoch ist auch hier die Streuung relativ hoch. Trotzdem lassen die Ergebnisse auch hier den Schluss zu, dass die Abbildung des Anwendungsfalls als realitätsnah beschrieben werden kann.

2.1.6.5 Flotten- und Logistiksimulation

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wird zur vollumfänglichen Abbildung der Anwendungsfälle basierend auf den in Arbeitspaket 1.1 ausgearbeiteten Anforderungen eine Simulationsumgebung aufgebaut. Diese ermöglicht es, den Betriebsablauf einer innerbetrieblichen elektrifizierten Nutzfahrzeugflotte anhand energetischer, wirtschaftlicher und logistischer Sicht zu analysieren und zu bewerten.

Bei der Flottensimulation handelt es sich um eine Co-Simulation des Logistiksystems und der Fahrzeugflotte eines Anwendungsfalls. Der Aufbau der Logistik- und Flottensimulation ist nicht anwendungsfallspezifisch gestaltet. Der Arbeitsaufwand zur Adaption auf einen anderen Anwendungsfall beschränkt sich auf die Erstellung der vorangegangenen Umfeld- und Triebstrangsimulationen für den jeweiligen betrachteten Anwendungsfall. Da die Triebstrangsimulation für jede implementierte Einzelkomponente des Modells eine Vielzahl an

Ergebnissen über die gesamte Simulationszeit ausgibt und dies für die Menge an Simulationen einen erheblichen Speicheraufwand bedeutet, werden diese so gekürzt, dass nur die wirklich notwendigen Parameter in der Simulation zur Verfügung stehen. Zu diesen Parametern zählen die insgesamt aus der Batterie entnommene Energie, der Gesamtzeitaufwand und die gefahrene Distanz jeder einzelnen möglichen Route sowie die durchschnittliche Batterie-Klemmenleistung. Die Flottensimulation wird in MATLAB als zeitdiskrete Simulation in reinem Code ausgeführt und verwendet die Ergebnisse der vorangegangenen Simulationen, um die Untersuchung unterschiedlicher Flottenkonstellationen zu ermöglichen. Als weiterer Eingangsparameter ist die hier als Logistikplan bezeichnete Übersicht über die in der Simulationszeit abzufertigen Container enthalten ist.

Eingangsdaten für diese Simulation stellt neben den oben beschriebenen Daten die Fahrzeug- und Systemparametrierung dar. Hier können vom Nutzer die Anzahl der Fahrzeuge in der Flotte, deren Batteriekapazität sowie die zulässigen Ladegradbereiche, die Anzahl der Ladepunkte sowie die deren jeweilige verfügbare maximale Ladeleistung und die Gesamtanschlussleistung der Ladetechnik vorgegeben werden.

Kernelement der Simulationsumgebung stellt zunächst die zentrale Steuerungseinheit des Logistiksystems der Simulation dar. Aufgabe dieses Elements ist primär die Zuweisung von Fahrzeugen zu Containern. Diese erfolgt über eine Bewertung der verschiedenen Fahrzeug- und Containerkombinationen anhand verschiedener Optimierungskriterien, wie etwa dem Energiebedarf. Weiterhin stellt die Einheit sicher, dass über die gesamte Zeit bei keinem Fahrzeug Betriebsgrenzen, wie etwa der zulässige Ladegrad der Fahrzeugbatterie oder die vom Fahrer einzuhaltenden Lenk- und Pausenzeiten, überschritten werden. Zweites zentrales Element ist die Steuerungseinheit der Ladetechnik. Diese weist Fahrzeuge, die einen Ladewunsch aufweisen, der vorher definierten Ladetechnik zu. Die in der Simulation implementierten Ladepositionen sind nicht technologiegebunden. Sie weisen lediglich eine Leistungsgrenze basierend auf den vom Nutzer getroffenen Einstellungen auf.

Ausgabeparameter der Simulation sind zunächst allgemeine Flottenkennwerte wie der Gesamtenergiebedarf der Fahrzeuge, der Verlauf des Flottenladegrades oder die insgesamt aus dem Stromnetz entnommene Energiemenge. Zur Bewertung der logistischen Performance wird sowohl der Zeitanteil der Fahrzeuge in verschiedenen Zuständen (Fahren, Laden, Verladen, Stillstand) als auch die Wartezeit eines jeden Containers im System aufgezeichnet. Letztgenannter Parameter dient vor allem dazu, dass System aus logistischer Sicht als funktionierend oder nicht ausreichend leistungsfähig zu klassifizieren.

Weiterhin werden auf jedes einzelne Fahrzeug aufgelöste detaillierte energetische Daten ausgegeben. Hierzu zählen der Energiebedarf der Fahrzeuge, die Geschwindigkeits- und Leistungsverläufe über die gesamte Simulationszeit sowie einige Batteriekennwerte und -verläufe. Diese werden im weiteren Verlauf zur internen Validierung der Ergebnisse genutzt, indem diese zurück in das Triebstrangmodell gespeist und die Ergebnisse abgeglichen werden. In der folgenden Abbildung ist beispielhaft der Verlauf der Ladegrade der

Einzelfahrzeuge und des Flottenladegrades sowie die Leistungsaufnahme der Ladetechnik über einen Simulationsdurchlauf von 24 h dargestellt.

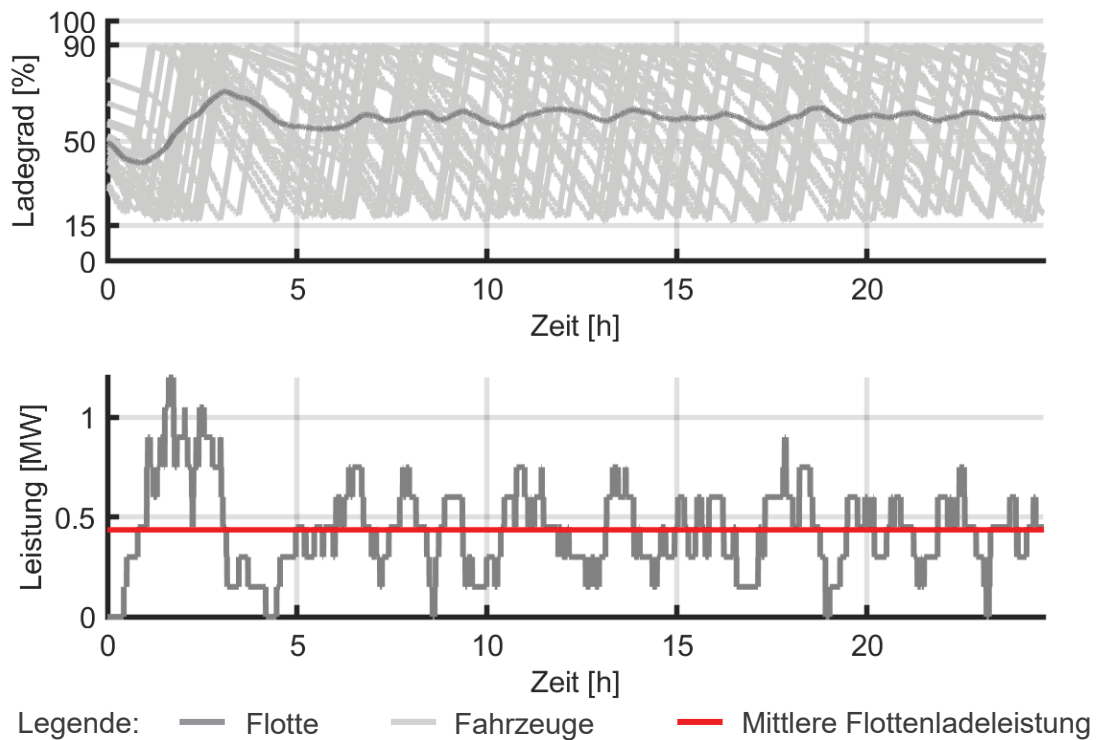


Abb. 2-30: Beispielhafter Ladegrad- und Ladeleistungsverlauf

Ein Vergleich mit den vorliegenden Messdaten legt nahe, dass die Ergebnisse nahe, dass die Simulationsergebnisse das Verhalten der Fahrzeuge und des Gesamtsystems realitätsnah abbilden. Ein direkter Vergleich ist hier jedoch aufgrund der Datenlage nicht möglich.

2.1.6.6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Arbeitspakets können durch das ika Umfeldsimulationen für 3 Anwendungsfälle aufgebaut und validiert werden. Weiterhin wird eine maßgeschneiderte Simulationsumgebung erstellt, welche die Simulation des logistischen Systems Terminal Tractor bzw. AGV ermöglicht. Soweit möglich wird für alle erstellten Modelle eine erfolgreiche Validierung der Ergebnisse durchgeführt.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Folgenden sind die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises dargestellt.

| Kostenart | Budget lt. Zuwendungsbescheid vom 31.10.2018 + Änderungsbescheid vom 11.02.2020 / 22.04.2021 | Tatsächlich verausgabte Beträge |
|---|---|--|
| Personalkosten Wissenschaftler (0812) | 339.441,10 € | 338.118,91 € |
| Personalkosten Arbeiter (0817) | 11.158,11 € | 11.901,06 € |
| Personalkosten HiWis (0822) | 33.188,73 € | 35.532,21 € |
| Gegenstände bis 800/410/400 € (0831) | 4.735,89 € | 4.879,61 € |
| Mieten und Rechnerkosten (0834) | 0,00 € | 0,00 € |
| Vergabe von Aufträgen (0835) | 0,00 € | 0,00 € |
| Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben (0843) | 0,00 € | 0,00 € |
| Dienstreisen (0846) | 8.120,00 € | 1.005,58 € |
| Gegenstände von mehr als 800/410/400 € (0850) | 0,00 € | 0,00 € |
| Summe | 396.643,83 € | 391.437,37 € |

Abb. 2-31: Übersicht wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit

Zur Erreichung der unter 1.1 beschriebenen Aufgabenstellung und der Gewinnung der unter 2.1 entsprechenden Forschungsergebnisse sind die in 2.2 aufgeführten Aufwände notwendig und angemessen. Zur Beantwortung der eingangs aufgeführten Fragestellungen sind in allen Arbeitspaketen die Leistungen des wissenschaftlichen Personals inklusive studentischer Hilfskräfte erforderlich. Untersuchungen der entwickelten Batteriemodule, vgl. 2.1.4, erfordern zudem den Einsatz von technischem Personal und bedingen entsprechende Materialbeschaffungen.

Auf Grundlage der Ergebnisse kann zunächst in enger Zusammenarbeit mit den Hafenbetreibern der Einsatz elektrifizierter schwerer Nutzfahrzeuge in deutschen Häfen untersucht werden. Hierbei werden speziell die Besonderheiten für den Betrieb batterieelektrischer Terminal Tractors und die damit verbundenen Einschränkungen, speziell mit Hinblick auf die durch die Antriebsart bedingten deutlich längeren Zeiten zum Füllen des Energiespeichers betrachtet.

Unter Verwendung der im diesen Projekt durch das Institut für Kraftfahrzeuge aufgebauten Simulationsmodelle können Aussagen über die notwendige Dimensionierung der zu verwendenden Komponenten in einem solchen Fahrzeug getroffen werden. Hierbei stellen sich vor allem zwei Zieldimensionen heraus:

- Größe des Energiespeichers
- Kosten und Umwelteinfluss des Energiespeichers

Basierend auf den Simulationsergebnissen können für die deutsche Hafenwirtschaft, hier vor allem den Anwendern sowie Herstellern solcher Fahrzeuge, Empfehlungen gemacht werden,

wie die Fahrzeuge zu dimensionieren sind. In der Form, wie es durch die Arbeiten des Instituts für Kraftfahrzeuge in diesem Projekt durchgeführt wird, war dies bisher mit Blick auf die Detailtiefe sowie die Güte der zugrundeliegenden Daten nicht möglich.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse

Die konkreten und methodischen Ergebnisse des Projekts werden in Form des Abschlussberichts sowie weiterer geplanter Veröffentlichung der Allgemeinheit zugänglich gemacht und bieten damit für Logistikknotenbetreiber, Fahrzeughersteller, Zulieferer und andere Unternehmen im Logistikumfeld einen direkten Nutzen. Dieser bezieht sich einerseits auf das beschriebene methodische Vorgehen, welches für ähnliche Fragestellungen analog genutzt werden kann, andererseits auch auf die konkreten Ergebnisse, bspw. in Bezug auf die Komponentendimensionierung und Wirtschaftlichkeit einer elektrifizierten Hafenflotte.

Darüber hinaus sind aus der Bearbeitung der in dem vorliegenden Forschungsprojekt adressierten Inhalte neu identifizierte Fragestellungen entstanden. Diese sind Ausgangspunkt zukünftiger wissenschaftlicher Vorhaben des Instituts für Kraftfahrzeuge. Darüber hinaus können die Projekteinhalte und Ergebnisse nach Abschluss des Projektes sowohl zur Ausbildung von Studenten in Lehrveranstaltungen und Abschlussarbeiten als auch zur Verfassung von Doktorarbeiten genutzt werden.

Die entwickelten Lade- bzw. Betriebsstrategien der Fahrzeugflotte können im Anschluss an das Projekt durch das Institut zu einem höheren technischen Reifegrad weiterentwickelt werden. Hierdurch ergibt sich die potentielle Möglichkeit, diese im Praxiseinsatz zur Koordination der Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur einzusetzen. Die geeignete Integration in überlagerte logistische Planungsprozesse ist dabei zu prüfen. Ebenso kann die Ladestrategie in Verbindung mit der zuvor genannten Simulationsumgebung für weitere konzeptionelle Untersuchungen eingesetzt werden. Die dargestellten Anschlussmöglichkeiten für die Simulationsumgebung können im Rahmen konsekutiver nationaler oder internationaler Forschungs- und Entwicklungsvorhaben durchgeführt werden. Hierbei werden die Modelle an die spezifischen Anwendungsfälle oder Fragestellungen adaptiert und appliziert. Die weiterhin geschilderte Fortentwicklung der Lade- und Betriebsstrategie kann ebenfalls im Rahmen von weiteren Forschungs- und Entwicklungsvorhaben geschehen.

Software und Codes: Die im Projekt implementierte Simulationsumgebung bildet die energetisch relevanten Einflüsse des Betriebs einer Flotte elektrischer Terminal Trucks ab. Während diese Methodik im Projektverlauf auf die vorliegenden Anwendungsfälle angewendet und erprobt wird, kann diese nach Projektende auch auf andere Fragestellungen übertragen werden. Dies wird durch die physikalische Darstellung der technischen Teilsysteme sowie die Anbindung an Datenbanken für Umfeldinformationen wie Digitalkarten oder beispielsweise Wetterdienste ermöglicht. Hieraus ergeben sich verschiedene Szenarien zur Anschlussfähigkeit über das Projektende hinaus. Zunächst kann die Abbildung der technischen Teilsysteme dem Stand der Technik folgend stetig aktualisiert werden. In einem übergeordneten Schritt kann der Einsatz elektrischer Terminal Trucks für weitere

Einsatzszenarios auf nationaler- oder internationaler Ebene untersucht werden und die Simulationsumgebung zur Konzeption verwendet werden. Bei einer formalisierten Betrachtung lassen sich die Projektergebnisse auf Flotten elektrischer Fahrzeuge (mit gegebenenfalls teilweise oder vollständig bekanntem Betriebsprofil) und der korrespondierenden Ladeinfrastruktur übertragen. Somit ist die Anschlussfähigkeit auf anderweitige Konzepte, beispielsweise automatisierte Shuttle Fahrzeuge, gegeben. Für solche Systeme liegt dank der stetig steigenden Vernetzung ebenfalls die Kenntnis über das Einsatzprofil sowie eine Schnittstelle zur Modifikation des Betriebs, beispielsweise durch eine Ladestrategie, vor.

2.5 Bekannt gewordener Fortschritt anderer Stellen

Keiner

2.6 Geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Ursprünglich waren einige Veröffentlichungen der Ergebnisse im Laufe des Projekts geplant. Aufgrund der allgemein bekannten pandemischen Lage sowie dem vorgezogenen Projektende konnten diese jedoch nicht durchgeführt werden, da insbesondere Tagungen in den Jahren 2020 und 2021 nur sehr eingeschränkt angeboten wurden. Folgende Themen bzw. Ergebnisse sind ika-seitig zur Veröffentlichung geplant:

- Simulationsmethodik, welche unter den Arbeitspaketen 4.1 und 4.2 aufgebaut wurde
- Methodik zur Erstellung eines Referenzzyklus am CTA, welche unter Arbeitspaket 1.1 aufgebaut wurde.

3 Literaturverzeichnis

- [BRE16] BRENNAN, J. W.; BARDER, T. E.
Battery Electric Vehicles vs. Internal Combustion Engine Vehicles
Arthur D. Little, Brüssel, 2016
- [BUN19] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz
Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen
Brennstoffemissionshandelsgesetz - BEHG, Berlin, 2019
- [BRA19] BRAUN, P.
Elektrische Charakterisierung und Modellierung von Festkörperbatterien
KIT Scientific Publishing, 2019
- [BUN20a] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE
Bundeskabinett beschließt höheren CO₂-Preis, Entlastungen bei Strompreisen
und für Pendler
<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/20200520-bundeskabinett-beschliesst-hoeheren-co2-preis.html>, abgerufen am
02.06.2020, 2020
- [CTA17] CTA Container Terminal Altenwerder
Übersicht Baubestand, Hamburg, 2017
- [DEN13] DEN BOER, E.; AARNINK, S.; KLEINER, F.; PAGENKOPF, J.
Zero emissions trucks
An overview of state-of-the-art technologies and their potential
CE Delft, Delft, 2013
- [FIS15] FISCHER, F.; HELLMANN, C.
Potenziale, Erfolgsfaktoren und Entscheidungshilfen für den Einsatz von
EMobility bei mittelständischen Logistikdienstleistern, München, 2015
- [FRI17] FRIES, M.; KERLER, M.; ROHR, S.
An Overview of Costs for Vehicle Components, Fuels, Greenhouse Gas
Emissions and Total Cost of Ownership - Update 2017, München, 2017
- [HAL15] HALLER, M.; LORECK, C.
Dokumentation EEG-Rechner
Bedienungsanleitung, Berlin, 2015
- [HIL12] HILL, N.
A review of the efficiency and cost assumptions for road transport vehicles to
2050, Harwell Oxford, Didcot, 2012

- [ISE10] ISERMANN, R.
Elektronisches Management motorischer Fahrzeugantriebe
Elektronik, Modellbildung, Regelung und Diagnose für Verbrennungsmotoren
Getriebe und Elektroantriebe
Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2010
- [KAM18] KAMPKER, A.; VALLÉE, D.; SCHNETTLER, A.
Elektromobilität
Springer Berlin Heidelberg, 2018
- [KER20] KERAMIDAS, K.; DIAZ VAZQUEZ, A.; WEITZEL, M.; VANDYCK, T.; TAMBA, M.
Global Energy and Climate Outlook 2019: Electrification for the low-carbon transition
The role of electrification in low-carbon pathways, with a global and regional focus on EU and China, Sevilla, 2020
- [KOO15] KOOIJMAN, DENNIS G.; BALAU, ANDREEA E.; WILKINS, STEVEN
WLTP Random Cycle Generator
IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Montréal, Kanada, 2015
- [LÖS19] LÖSCHEL, A.; ERDMANN, G.; STAIß, F.; ZIESING, H.-J.
Stellungnahme zum zweiten Fortschrittsbericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2017
Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“, 2019
- [MWV04] MWV – Mineralölwirtschaftsverband e.V.
Preisbildung am Rohölmarkt
Saphir Druck und Verlag, Ribbesbüttel,
- [MWV06] MWV – Mineralölwirtschaftsverband e.V.
Preisbildung an Tankstellen
Saphir Druck und Verlag, Ribbesbüttel, 2006
- [OKE11] OKEEFE, M.; BROOKER, A.; JOHNSON, C.; MENDELSON, M.; NEUBAUER, J.; PESARAN, A.
Battery Ownership Model
A Tool for Evaluating the Economics of Electrified Vehicles and Related Infrastructure
25th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exposition, 2011
- [PRE19] PRESSE- UND INFORMATIONSAMT DER BUNDESREGIERUNG
CO2-Bepreisung

- <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/co2-bepreisung-1673008>, abgerufen am 15.05.2020, 2019
- [PRE20a] PRESSE- UND INFORMATIONSAMT DER BUNDESREGIERUNG
Grundlage für CO₂-Preis steht
<https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/nationaleremissionshandel-1684508>, abgerufen am 02.06.2020, 2020
- [PRE20b] PRESSE- UND INFORMATIONSAMT DER BUNDESREGIERUNG
Klimaschutz: Bürger entlasten
<https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzbuenger-entlasten-1672984>, abgerufen am 02.06.2020, 2020
- [SCO20] SCORRANO, M.; DANIELIS, R.; GIAN SOLDATI, M.
Dissecting the total cost of ownership of fully electric cars in Italy: The impact of annual distance travelled, home charging and urban driving
Research in Transportation Economics, 2020
- [WAG19] WAGNER, J.; HENNES, O.; ZINKE, J.; JEDDI, S.; MADLENER, R.; SCHMITZ, H.; WOLFF, S.
Auswirkungen von CO₂-Preisen auf den Gebäude-, Verkehrs- und Energiesektor
E.ON Energy Research Center (E.ON ERC), Aachen, 2019

Berichtsblatt – Institut für Kraftfahrzeuge (ika) RWTH Aachen University

Durch das Institut für Kraftfahrzeuge kann Arbeitspaket 1 zunächst in Zusammenarbeit mit Konecranes sowie den am Anfang am Projekt beteiligten Hafenbetreibern eine eingehende Analyse der zu betrachtenden Anwendungsfälle durchgeführt werden. Hier werden die Besonderheiten des Einsatzprofils eines Terminal Tractors für die Einsatzorte Container Terminal Altenwerder (CTA) und den Düsseldorfer Container Hafen (DCH) untersucht und in den Simulationen abzubildende Elemente identifiziert. Zusätzlich wird am CTA das Automated Guided Vehicle betrachtet. Basierend auf den Daten wird ein repräsentativer Referenzzyklus erstellt. Weiterhin können für andere in deutschen Häfen eingesetzte Fahrzeugtypen Leistungsprofile abgeleitet werden und in Testprozeduren für den Batterieprüfstand überführt werden. Zudem wird in diesem Arbeitspaket ein TCO-Modell eines Terminal Tractors aufgebaut, welches einen direkten Vergleich der Kosten von konventionellem zu elektrifiziertem Fahrzeug ermögliche. Ebenso werden hier Optimierungspotenziale für zukünftige Forschungsvorhaben identifiziert.

Im Rahmen des Arbeitspakets 3 können durch das Institut für Kraftfahrzeuge basierend auf den durchgeführten Berechnungen basierend auf dem Referenzzyklus sowie weiteren Simulationsergebnissen Anforderungen an das Batteriesystem bzw. –modul gestellt werden. Anhand repräsentativer Leistungsprofile verschiedener Anwendungsfälle werden auf dem Batterieprüfstand des ika Tests an dem von BMZ aufgebauten Batteriemodul durchgeführt. Hier kann die Leistungsfähigkeit dessen für den Einsatz im Hafenbereich, speziell für den Terminal Tractor, nachgewiesen werden.

Die im Arbeitspaket 4 durchgeführten Arbeiten, der Aufbau der Simulationsumgebungen, stellen das Rückgrat für alle durchgeführten Untersuchungen dar. Es werden im Rahmen des Projekts Umfeldsimulationen für die Anwendungsfälle CTA-TT, DCH-TT und CTA-AGV erstellt und anhand vorliegender Messdaten validiert. Zudem werden für Triebstrangsimulationsmodelle für den Terminal Tractor und das Automated Guided Vehicle erstellt und ebenfalls validiert. Zur Abbildung der Flotte im Betriebsablauf wird durch das ika eine anwendungsfallunabhängige Simulationsumgebung zur Darstellung des Betriebsablaufs einer elektrifizierten Flotte innerbetrieblich eingesetzter schwerer Nutzfahrzeuge im Hafen aufgebaut. Bei der Erstellung dieser können durch das ika Erfahrungen in Bezug auf die Abbildung gesammelt und appliziert werden. Die Übertragbarkeit der aufgebauten Flottensimulationsumgebung auf einen weiteren Anwendungsfall kann im Projektverlauf selbst nachgewiesen werden.

Basierend auf den Teilergebnissen der Arbeitspakete können für die Häfen Empfehlungen in Hinblick auf die Flottenkonstellation und die Dimensionierung der Komponenten der Fahrzeuge gegeben werden. Besonderer Fokus liegt hier auf der Auslegung der Traktionsbatterie der Fahrzeuge. Zudem ist ebenfalls auf Grundlage der Ergebnisse eine Dimensionierung sowohl der einzelnen Ladepositionen als auch der gesamten Ladetechnik möglich.

Berichtsblatt – Institute for Automotive Engineering (ika) RWTH Aachen University

The Institute for Automotive Engineering, in cooperation with Konecranes and the port operators involved in the project at the beginning, can first carry out a detailed analysis of the use cases to be considered in work package 1. Here, the special features of the application profile of a terminal tractor for the Container Terminal Altenwerder (CTA) and the Düsseldorf Container Port (DCH) are examined and elements to be represented in the simulations are identified. In addition, the Automated Guided Vehicle will be considered at the CTA. Based on the data, a representative reference cycle will be created. Furthermore, performance profiles can be derived for other vehicle types used in German ports and transferred into test procedures for the battery test bench. In addition, a TCO model of a terminal tractor will be developed in this work package, which will enable a direct comparison of the costs of conventional and electrified vehicles. Potential for optimization for future research projects will also be identified here.

Within the scope of work package 3, the Institute for Motor Vehicles can set requirements for the battery system or module based on the calculations carried out on the basis of the reference cycle and other simulation results. Based on representative performance profiles of various applications, tests are carried out on the battery module built by BMZ on the battery test bench of the ika. Here, the performance of the module for use in the port area, especially for the terminal tractor, can be demonstrated.

The work carried out in work package 4, the construction of the simulation environments, represents the backbone for all the investigations carried out. Within the scope of the project, environment simulations for the application cases CTA-TT, DCH-TT and CTA-AGV are created and validated on the basis of available measurement data. In addition, drive train simulation models for the Terminal Tractor and the Automated Guided Vehicle will be created and also validated. In order to represent the fleet in the operational process, the ika is developing an application-independent simulation environment for the representation of the operational process of an electrified fleet of heavy commercial vehicles used internally in the port. During the creation of this environment, the ika will be able to gather and apply experience with regard to mapping. The transferability of the built fleet simulation environment to another application can be proven in the course of the project itself.

Based on the partial results of the work packages, recommendations can be made for the ports with regard to the fleet constellation and the dimensioning of the vehicle components. Special focus is placed here on the design of the traction battery of the vehicles. In addition, a dimensioning of both the individual charging positions and the entire charging technology is also possible on the basis of the results.