



Abschlussbericht

Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität

Projekt:

„Batterie-elektrischer Terminal Truck im Feldversuch“

**Entwicklung eines batteriebetriebenen Terminal Trucks und Erprobung im Rahmen eines Feldversuchs
in einem deutschen Binnenhafen und dem Containerterminal eines deutschen Seehafens**

Juli 2018

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
- Konecranes, Demag Cranes & Components GmbH, 40597 Düsseldorf	16EM1004
- Hermann Paus Maschinenfabrik GmbH, 48488 Emsbüren	16EM1008
- REFU Elektronik GmbH, 72793 Pfullingen	16EM1007
- Neuss Trimodal GmbH, 41460 Neuss	16EM1009
- HHLA Container Terminal Altenwerder, 21129 Hamburg	16EM1005
- ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, 69121 Heidelberg	16EM1006
Projektleiter Konecranes:	Tel.:
Dr. Armin Wieschemann	0211/7102-3361
	E-Mail:
	armin.wieschemann@konecranes.com
Laufzeit des Vorhabens:	
von: 01.06.2012	bis: 30.11.2017
Berichtszeitraum	
von: 01.06.2012	bis: 30.11.2017

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	3
2. Zielstellung des Verbundprojektes.....	5
a. Gesamtziel des Verbundes.....	5
b. Aufgaben der einzelnen Partner.....	6
3. Darstellung der Ergebnisse des Verbundprojekts gegliedert nach Arbeitspunkten.....	16
AP1 – Marktanalyse.....	16
AP2 – Anforderungen.....	18
AP3a - Forschung und Entwicklung Konzepte Terminal Truck.....	22
AP3b - Forschung und Entwicklung Batterielade- und -wechselstrategien.....	29
AP4 - Technisch-wirtschaftliche Bewertung.....	31
AP5a - Forschung und Entwicklung Antriebsstrang.....	32
AP5b - Forschung und Entwicklung Batterietechnik (Bericht der Fa. REFU)“.....	34
AP5c - Konstruktive Umsetzung.....	45
AP 6 - Aufbau.....	51
AP 7: Versuchsprogramm und Inbetriebnahme.....	54
AP8 – Testbetrieb CTA / Neuss Trimodal.....	61
AP9 – Ökologische Begleitforschung (bereitgestellt durch das ifeu).....	69
4. Vergleich der Projektergebnisse zum internationalen Stand der Technik.....	86
5. Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB).....	86

1. Zusammenfassung

Das Vorhaben war ein Verbundprojekt zwischen den drei industriellen Partnern Konecranes Gottwald (kurz Konecranes, vormals Gottwald -> Terex -> Konecranes), Hermann Paus Maschinenfabrik GmbH (kurz Paus), REFU Elektronik GmbH (kurz REFU), Neuss Trimodal GmbH (kurz NTM) und der HHLA Container-Terminal Altenwerder GmbH (kurz CTA). Damit sind im Verbundprojekt führende deutsche Unternehmen aus den Bereichen Fahrzeugherstellung, Leistungselektronik und Logistik vereint, die zusammen die Entwicklung, die technische Umsetzung und den Feldversuch des neuen Fahrzeugkonzepts in einem realen betrieblichen Umfeld bearbeiten konnten. Ergänzend war das Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg (kurz ifeu) am Projekt beteiligt, um die ökologische Begleitforschung im Projekt sicherzustellen.

Der Wirtschaftsverkehr ist ein unverzichtbarer Motor für den globalen Handel und zugleich Ursache zahlreicher Umweltbelastungen. Der jährliche weltweite Containerumschlag betrug in 2014 über 600 Mio. TEU (TEU = 20' Container). Über deutsche Seehäfen wurden in 2014 rund 15,8 Mio. TEU umgeschlagen, davon 9,7 Mio. TEU alleine im Hafen Hamburg. Für die Exportnation Deutschland mit einem Exportvolumen von 992 Milliarden Euro (2008) sind der Export und damit der Zugang zu internationalen Märkten von entscheidender Bedeutung. Dieser Zugang wird insbesondere über Seehäfen sichergestellt.

Jeder Container muss innerhalb der Häfen über Schwerlastfahrzeuge transportiert werden. Hierzu werden spezielle Fahrzeugtypen wie Portalhubwagen, Reach-Stacker, Greifstapler oder auch fahrerlose Transportsysteme (englisch: Automated Guided Vehicle bzw. AGV) eingesetzt. Die weltweit größte Verbreitung haben jedoch spezielle Zugmaschinen, so genannte Terminal-Trucks (TT). Da im Gegensatz zu den elektrisch betriebenen Kranen die Schwerlastfahrzeuge in der Regel einen dieselbetriebenen Antrieb haben, sind diese für einen Großteil der landseitigen Schadstoffemissionen in Häfen mit verantwortlich.

Die Projektpartner hatten sich das gemeinsame Ziel gesetzt, einen batterie-elektrisch angetriebenen Terminal Truck zu entwickeln und anschließend einen Prototyp aufzubauen und im Praxiseinsatz zu untersuchen. Als Energiespeicher wurden zwei alternative Traktionsbatterien entwickelt und eingesetzt, wobei eine Li-Ionen-Batterie und eine Blei-Säure-Batterie verwendet wurden. Zu einem späteren Zeitpunkt wurde eine zweite Variante einer Li-Ion-Batterie als Projekterweiterung eingesetzt. Die technischen Daten von Li-Ionen-Batterien hinsichtlich Energiedichte und Wirkungsgrad sind Blei-Säure-Batterien deutlich überlegen. Aufgrund der kompakten Baugröße war es möglich, die Li-Ionen-Batterie direkt im Chassis des Terminal Trucks anzuordnen. Blei-Säure-Batterien weisen zum heutigen Zeitpunkt jedoch immer noch eine bessere Wirtschaftlichkeit und eine sehr hohe Zuverlässigkeit auf, was eine wichtige Voraussetzung für die Einführung neuer Produkte ist. Die Blei-Säure-Batterie wurde in einen Trailer integriert, der im Projekt dafür umgebaut wurde.

Das System, bestehend aus Terminal Truck, Trailer und Batterien, wurde in einem Feldversuch auf zwei Containerterminal getestet. Parallel dazu wurden geeignete Konzepte und Strategien zum Laden und/oder Wechseln der Traktionsbatterien erarbeitet und zum Teil auch erprobt.

Der Feldversuch hatte das Ziel, fahrzeugtypische Leistungsdaten sowie Verbrauchs- und Emissionswerte unter realen Einsatzbedingungen zu ermitteln und mit den Eigenschaften dieselbetriebener Fahrzeuge zu vergleichen. Weiterhin war die Ermittlung der Nutzerakzeptanz der batteriebetriebenen Fahrzeuge bezüglich Handling, Leistung, Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit ein wesentliches Ziel. Die am Ende des Feldversuchs bereitstehenden Auslegungskennzahlen, stellen die Voraussetzungen für eine Markteinführung größerer Fahrzeugflotten dar. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Antriebsstrang und das Batteriekonzept erfolgreich getestet werden konnten. Das grundlegende, entwickelte Fahrzeugkonzept kann als Basis für eine Serienentwicklung herangezogen werden. Der Umweltnutzen des batterie-elektrischen Antriebsstrangs wurde im Rahmen einer umfangreichen ökologischen Begleitforschung bewertet.

Die ökologische Bewertung des B-TT-Betriebs an den beiden Feldteststandorten Neuss-Trimodal (NTM) und Containerterminal Altenwerder (CTA) zeigte deutliche Vorteile des batterieelektrischen Antriebs gegenüber dem herkömmlichen Dieselantrieb. Die Treibhausgasemissionen (unter Berücksichtigung des gesamten Fahrzeuglebenswegs) konnten um 38 % (CTA) bzw. 17 % (NTM) gesenkt werden, der kumulierte Energieaufwand etwa

im gleichen Maße. Beim Versauerungspotential lagen die Einsparungen etwas höher, die Stickoxidemissionen können gar um etwa eine Größenordnung durch den Einsatz von B-TT gesenkt werden, wodurch ein spürbarer Beitrag zur Luftqualität im Hafengebiet geleistet werden kann.

Hinsichtlich des Betriebsprofils kann der elektrische Antrieb seine Stärken vor allem dann ausspielen, wenn häufig in Teillast gefahren wird. Im Feldtest war dies vor allem bei CTA der Fall. Hinsichtlich Gewicht (und damit auch Energieverbrauch) werden von den Projektpartnern Konecranes und Paus für zukünftige B-TT-Serienfahrzeuge gegenüber dem Prototypen noch einige Reduktionspotentiale gesehen.

2. Zielstellung des Verbundprojektes

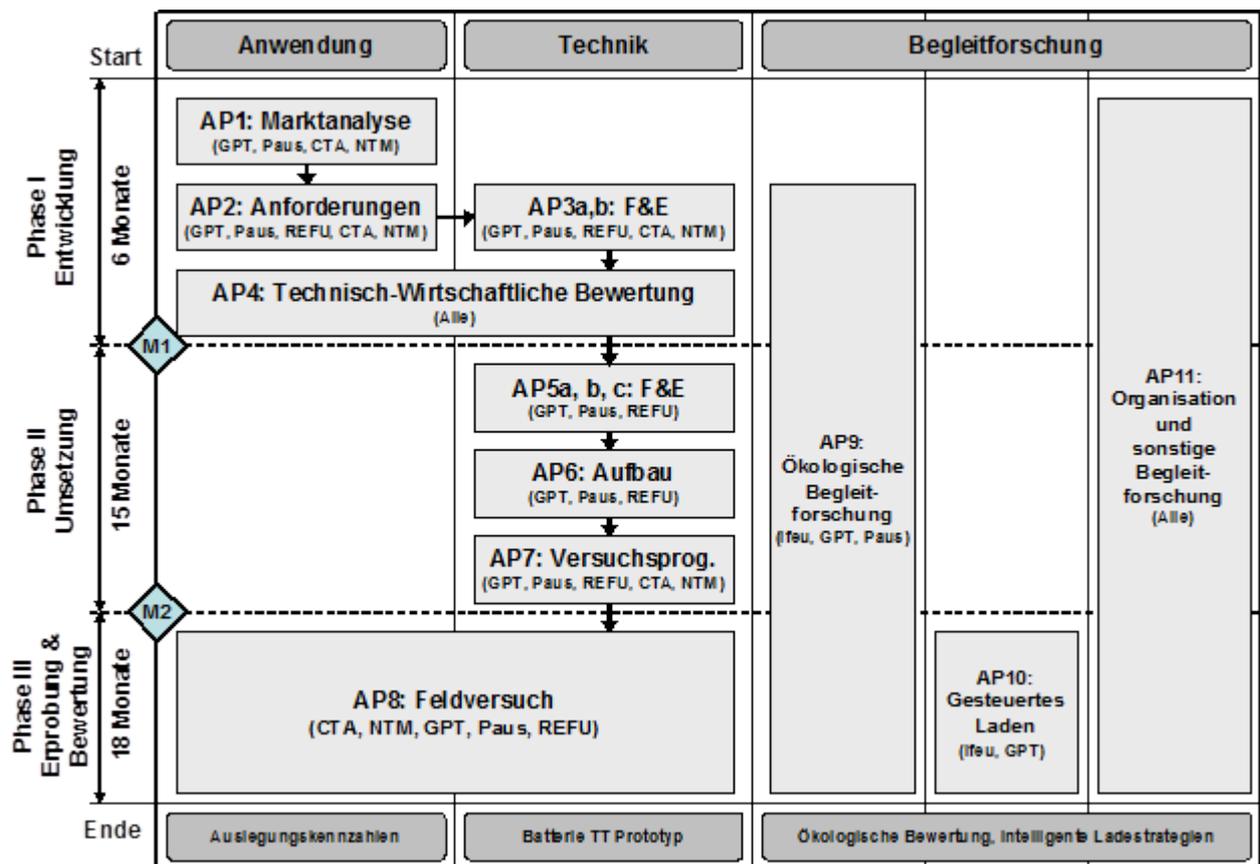
a. Gesamtziel des Verbundes

In dem Projekt „Batterie-elektrischer Terminal Truck im Feldversuch“ sollte ein Terminal Truck Prototyp entwickelt und Feldversuchen unterzogen werden, der als Vorbild für eine spätere Serienentwicklung vorgesehen ist. Vorrangig untersucht wurde der höchst effiziente Antriebsstrang in Verbindung mit einer serientauglichen Batterie. In den Feldtests wurden die Vorberechnungen hinsichtlich Batteriekapazität und Energieverbrauch verifiziert.

Das Projekt wurde in drei Abschnitte gegliedert:

- Phase I: Entwicklung
- Phase II: Umsetzung
- Phase III: Erprobung und Bewertung

Parallel zu diesen drei Phasen erfolgten eine umfangreiche ökologische Begleitforschung sowie eine Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit einer gesteuerten Ladestrategie zur ausgleichenden Netznutzung und Optimierung der Stromkosten. Zwischen den Phasen sind die Meilensteine M1 und M2 geplant, an denen das Projekt abgebrochen werden kann, falls sich wider Erwarten in der vorangegangenen Phase herausstellen sollte, dass eine weitere Projektbearbeitung nicht mehr zielführend wäre. Die unten stehende Abbildung zeigt die Projektübersicht mit der Aufteilung der Arbeiten der einzelnen Projektpartner.



b. Aufgaben der einzelnen Partner

Die nachfolgende Auflistung stellt die gewählten Arbeitspunkte mit den jeweils beteiligten Projektpartnern vor:

AP1 - Marktanalyse			
GPT	Paus	REFU	CTA/NTM
<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung eines Fragebogens o. Ä. zu den relevanten Einsatzbedingungen in Containerterminals und Industrieanwendungen • Befragung von Anwendern im Rahmen von Workshops • Ergänzende Recherche zu Einsatz- und Umgebungsbedingungen • Darstellung der Informationen in einer Datenbank • Befragung von Anwendern im Rahmen von Workshops • Begleitung der Recherche zu Einsatz- und Umgebungsbedingungen sowie Analyse zu fahrzeugtechnischen Aspekten auf den Absatzmärkten <p>CTA und NTM:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung und Bereitstellung von Informationen zum Einsatz bei Neuss Trimodal, CTA und weiteren HHLA-Terminals 			

AP2 - Anforderungen			
GPT	Paus	REFU	CTA/NTM
<ul style="list-style-type: none"> • Allgemeine, Umgebung Betriebsanforderungen (Fahrzeit, Einsatzzeit, etc.) • Anforderungen an den batterie-elektrischen Antriebsstrang (Antriebsleistung, Geschwindigkeiten, etc.) • Gruppierung und Dokumentation der Anforderungsklassen • Anforderungen an das Chassis und das Fahrwerk • Ausstattung der Fahrerkabine • Sondierung sicherheitstechnischer Randbedingungen einschl. Vorgespräche mit relevanten technischen Überwachungsorganisationen • Anforderungen an die Batterietechnik und Ladetechnik • Anforderungen an Leistungselektronik • Umwelt, Temperatur, EMV, Isolation, Normen, Sicherheit <p>CTA und NTM:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung der kundenspezifischen Anforderungen an die einzusetzende Batterie. • Darstellung der Anforderungen am CTA bzw. bei NTM in Bezug auf die Anbringung der Batterie im/am Truck im Hinblick auf eine Integration in die Betriebsabläufe • Beachtung von ergonomischen, wartungs- und sicherheits-technischen Aspekten • CTA und NTM unterstützen bei der Formulierung einer Anforderungsdefinition <p>Nur CTA:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prüfung einer Übertragbarkeit auf weiter Terminalfahrzeuge in der HHLA 			

AP3a - Forschung und Entwicklung Konzepte Terminal Truck			
GPT	Paus	REFU	CTA/NTM
<ul style="list-style-type: none"> • Konzeption des Antriebsstrangs inkl. Nebenverbraucher • Konzeption Blei-Säure-Batterie • Schnittstellendefinition zwischen Terminal Truck Chassis, Batterie und Antriebsstrang- Komponenten • Konzeption des Terminal Truck Chassis • Schnittstellendefinition zwischen Terminal Truck Chassis, Batterie und Antriebsstrang-Komponenten • Überprüfung von Konzepten für Antriebe von hydraulischen Hilfssystemen und ggf. Alternativentwurf • Vorauslegung der Lithium Eisen Phosphat Batterie • Mitwirkung bei der Konzeption des Antriebsstrangs (Leistungselektronik) <p>CTA und NTM:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abstimmung eines geeigneten Lösungskonzepts für die Anwendung bei CTA und NTM auf Basis der dort herrschenden Randbedingungen • Detaillierte Aufstellung verschiedener Konzepte zur Abschätzung der technischen Machbarkeit und des wirtschaftlichen Aufwands für diese Neuentwicklung 			

AP3b - Forschung und Entwicklung Batterielade- und -wechselstrategien			
GPT	Paus	REFU	CTA/NTM
<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung geeigneter Batterielade- und Wechselkonzepte • Energiesimulation verschiedener Terminalsituationen • Konzeption einer geeigneten Ladeinfrastruktur • Mitwirkung bei der Entwicklung der Konzepte für den Batteriewechsel an der Zugmaschine • Ladegerät für Li-Ionen Batterie • Strategie des Betriebes mit einem Parallelkonzept zwischen Blei und Lithium Batterie <p>CTA und NTM:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung einer geeigneten Batterielade- und -wechselstrategie für CTA und NTM • Differenzierungs-betrachtung zwischen „Ladung im Fahrzeug“ & „Austausch der Batterien“ • Entwicklung einer neuen Strategie zur betrieblichen Integration des neuen Terminal Trucks in die etablierten Betriebsabläufe/ Schichtmodelle. 			

AP4 - Technisch-wirtschaftliche Bewertung			
GPT	Paus	REFU	CTA/NTM
<ul style="list-style-type: none"> • Darstellung der Konzepte und deren Eigenschaften • Bewertung der Konzepte aus Herstellersicht • Bewertung und Auswahl des endgültigen Fahrzeugkonzepts • Bewertung der Konzepte hinsichtlich elektrotechnischen Eigenschaften • Bewertung und Auswahl des endgültigen Fahrzeugkonzepts • Bewertung der entwickelten Konzepte auf der Grundlage bekannter Bewertungsmethoden (qualitativ und quantitativ) • Bewertung aus Kundensicht hinsichtlich der Umsetzbarkeit sowie Kriterien wie Leistung, Reichweite, Komplexität, Verbrauch oder auch Investitions- und Betriebskosten • Systementscheidung für ein Ladekonzept im Terminal Truck oder ein Batteriewechselkonzept 			

AP5a - Forschung und Entwicklung Antriebsstrang			
GPT	Paus	REFU	CTA/NTM
<ul style="list-style-type: none"> • Modellierung und numerische Berechnung des Antriebsstrangs unter Berücksichtigung des Übertragungsverhaltens der Komponenten • Erarbeitung und simulative Untersuchung von Fahrstrategien (Fahren wie „normales“ Fahrzeug mit Verbrennungsmotor oder Einführung von „neuen Möglichkeiten“ wie Drehzahlregelung anstatt Momentensteuerung) • Auslegung und Spezifizierung der Antriebsmotoren und weiterer Antriebsstrang-komponenten • Festlegung der Leistungsdaten in Abhängigkeit der Gesamtanforderung und der einzuhaltenden Normen sowie sonstigen Anforderungen an das Gerät (Schutzart, Schwingungen, Stöße, Einbauart, Kühlart, etc.) • Detaillierung der mech. und elektr. Schnittstellen zum Chassis und zur Fahrerkabine • Fahrstrategien erarbeiten (Fahren wie „normales“ Fahrzeug mit Verbrennungsmotor oder Einführung von „neuen Möglichkeiten“ wie Drehzahlregelung anstatt Momentensteuerung) Auslegung der Leistungselektronik • Anpassung bestehender Systeme oder Neuentwicklung, wenn die Spezifikation nicht erfüllt wird • Software / Reglerstrukturen <p>Nur NTM: Beratende Tätigkeit aus Kundensicht</p>			

AP5b - Forschung und Entwicklung Batterietechnik			
GPT	Paus	REFU	CTA/NTM
<ul style="list-style-type: none"> • Abstimmung der mechanischen und elektrischen Schnittstellen zwischen Batterie und Fahrzeug • Auslegung und Auswahl Blei-Säure-Batterie mit Ladetechnik • Erarbeitung einer Ladeinfrastruktur für Blei-Säure-Batterie 			

- Erarbeitung einer Ladeinfrastruktur für Li-Ionen Batterie
- Optimierung des Energie- und Temperatenausgleichs zwischen den thermischen Systemen Kabine und Batterie
- F&E zu Li-Ionen Batterie in der erforderlichen Leistungsklasse
- Entwicklung eines geeigneten Ladegeräts

Nur NTM:

- Erarbeiten von Möglichkeiten zur Installation der Ladeinfrastruktur
- Beratende Tätigkeit aus Kundensicht

AP5c - Konstruktive Umsetzung

GPT	Paus	REFU	CTA/NTM
<ul style="list-style-type: none"> • Konstruktive Änderung eines Trailers für die Aufnahme einer Blei-Säure-Batterie • Erstellung von Konstruktionsunterlagen für den batterie-elektrischen Antriebsstrang • Technische Dokumentation • Begleitende Konformitätsbewertung (jeder Partner für seinen Engineering-Anteil incl. jeweils zweckmäßiger Einbeziehung der Schnittstellen) • Konstruktive Ausgestaltung Ladeinfrastruktur für Bleibatterie • Umfangreiche Fahrzeugumkonstruktion • Ausgestaltung der Fahrerkabine • Erstellung von Konstruktionsunterlagen • Technische Dokumentation • Begleitende Konformitätsbewertung (jeder Partner für seinen Engineering-Anteil incl. jeweils zweckmäßiger Einbeziehung der Schnittstellen) • Konstruktive Umsetzung Batterietrog • Konstruktive Ausgestaltung Ladeinfrastruktur für Li-Ionen-Batterie • Technische Dokumentation • Begleitende Konformitätsbewertung (jeder Partner für seinen Engineering-Anteil incl. jeweils zweckmäßiger Einbeziehung der Schnittstellen) 			
<p>Nur NTM:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Beratende Tätigkeit aus Kundensicht 			

AP6 - Aufbau

GPT	Paus	REFU	CTA/NTM
<ul style="list-style-type: none"> • Einbau des batterie-elektrischen Antriebsstrangs in das Terminal Truck Chassis • Umbau eines Trailers für die Aufnahme einer Blei-Säure-Batterie • Aufbau Wechselrahmen für Blei-Säure-Batterie 			

- Begleitende Konformitätsbewertung (jeder Partner für seinen Engineering-/Montageanteil incl. jeweils zweckmäßiger Einbeziehung der Schnittstellen)
- Test des elektrischen Antriebsstrangs und der Batterie im Zusammenspiel und gegen die Leistungsspezifikation
- Herstellung der Zugmaschine zum Einbau von Antriebsstrang und Batterie
- Begleitende Konformitätsbewertung (jeder Partner für seinen Engineering-/Montageanteil incl. jeweils zweckmäßiger Einbeziehung der Schnittstellen)

1) Batteriemontage

- Aufbau Batterietrog und Montage der Zellen
- Montage der Zellverbinder und der Balancer
- Montage von BMS, BDU und Safety-Modul (BDU – Battery Disconnect Unit)
- Montage von Batterieheizung und -kühlung
- Interne Verkabelung bis zum Batteriestecker
- Parametrierung des BMS / Zellmodell

2) Test der Batterie

- Funktions- und Belastungstest / Zyklentest
- Temperaturtest
- Isolationstest
- Überlast, Kurzschluss, Sicherheitsfunktionen
- Schock- und Schüttelprüfung
- Kippsicherheit

3) Aufbau der Leistungselektronik

- Begleitende Konformitäts-bewertung (jeder Partner für seinen Engineering-/Montageanteil incl. jeweils zweckmäßiger Einbeziehung der Schnittstellen)

Nur NTM:

- Lieferung und Montage spezifischer Terminalfunk- und -datensysteme
- Beratende Tätigkeit aus Kundensicht

AP7 - Versuchsprogramm Inbetriebnahme

GPT	Paus	REFU	CTA/NTM
<ul style="list-style-type: none"> • Inbetriebnahme und Test der Grundfunktionen gemeinsam mit Paus und REFU im Werk Gottwald • Versuchsprogramm zu Fahrzeugverbrauch 			

- Verbrauchs- und Schallmessungen
- Testfahrten bzgl. Ansprechverhalten und Fahrzeugregelung
- Integration von Messequipment
- Abgleich und Verifizierung Berechnungsmodell
- Test und Optimierung des mechanischen Fahrzeugverhaltens bei Testzyklen auf dem Gottwald Testgelände
- Testfahrten bzgl. Ansprechverhalten und Fahrzeugregelung
- Ggf. Abnahmeprüfung durch externe Prüfstellen.
- Test der geplanten Leistungsdaten, Enddrehzahlen, Momentenvorgaben
- Aufnahme von Spannung, Strom, Temperaturen, Kühlsystemdaten
- Test des Energiemanagements
- Messung Energiebilanz, SoC
- Test der Rekalibrierung
- Aufnahme von Fahrprofilen im Betriebseinsatz
- Testfahrten bzgl. Ansprechverhalten und Fahrzeugregelung
- GPT werksinterne Testfahrten durch erfahrene Terminal Truck Fahrer
- Ermittlung und Auswertung objektiver und subjektiver Testergebnisse
- Ggf. Erarbeitung von Verbesserungs-vorschlägen
- Prüfung der Nutzerakzeptanz (z.B. Fahrverhalten, Bedienung der Ladestation, Ergonomie, etc.)
- Bewertung der Eignung für den Einsatz im Feldversuch

AP8-Testbetrieb CTA/Neuss Trimodal			
GPT	Paus	REFU	CTA/NTM
<ul style="list-style-type: none"> • Installation Data-Logger • Regelmäßige Kontrolle des Fahrzeugzustands durch Servicepersonal • Aufnahme und Auslesen der Messdaten • Auswertung der Messdaten (z.B. Regressionsanalysen) • Ermittlung von Auslegungskennzahlen • Abgleich Simulationsmodell • Erstellung eines TCO-Modells • Begleitung des Fahrzeugbetriebs durch Servicepersonal • Begleitung der Auswertung der Messdaten <p>Neuss Trimodal:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Integration des neuen Fahrzeugs in die typischen Betriebsabläufe • Fahrzeugtest mit dem Anforderungsprofil Binnenterminal: Ungünstige Fahrbahnverhältnisse, öffentliche Straßen, Längere Fahrstrecken zur Verknüpfung von Fluss, Straße und Schiene (Trimodal) • Testbetrieb mit eigenen Testfahrern 			

- Transport von Sattelanhängern
- Test der Blei-Säure-Batterie im realen Containertransport
- Begleitung des Fahrzeugbetriebs durch speziell zu schulendes Servicepersonal
- Regelmäßig Entwicklungs-gespräche intern und mit den Verbundpartnern

CTA:

- Integration des neuen Fahrzeugs in die typischen Betriebsabläufe (Pendelbetrieb zwischen Lager und Bahnhof)
- Testbetrieb mit eigenen Testfahrern
- Aktives Monitoring von objektiven und subjektiven Fahreigenschaften/-bedingungen.
- Regelmäßig Entwicklungs-gespräche intern und mit den Verbundpartnern
- Erarbeitete Modifikationen erneut auf ihre Eignung hin bewerten
- Gemeinsame Ergebnis-auswertungen und -diskussionen
- Definition von geeigneten Testszenarien und Durchführung von Sondertestfahrten
- Begleitung des Fahrzeugbetriebs durch speziell zu schulendes Servicepersonal
- Findung von Verbesserungs-maßnahmen für die Konzeption eines möglichen Serienfahrzeugs.
- Untersuchung von Umwelteinflüssen auf das Testfahrzeug

AP9 - Personalaufwand		
GPT	Paus	ifeu
<ul style="list-style-type: none"> • Ökologische Begleitforschung • Informationsaustausch mit ifeu 		

AP10 - Personalaufwand	
GPT	ifeu
<ul style="list-style-type: none"> • Aufbau Berechnungsmodell • Modellierung von Szenarien zum gesteuerten Laden • Analyse der (zukünftigen) Situation im Stromnetz • Untersuchung des ökologischen Nutzens verschiedener Szenarien gesteuerten Ladens 	

AP11 - Organisation und sonstige Begleitforschung			
GPT	Paus	REFU	CTA/NTM
<ul style="list-style-type: none"> • Projektorganisation • Aufgaben der Projektbegleitung und Projektüberwachung, die in den AP 1 bis AP 10 kalkulatorisch nicht enthalten sind, u.a. auch Reisekosten 			

Grobüberblick terminlicher Projektverlauf

2011 Projektidee und Auswahl Konsortialpartner

- Konecranes (damals noch Gottwald Port Technology) – Konzeption, Auslegung Antriebsstrang, Elektroinstallation, Inbetriebnahme,
- Paus – Fahrzeugentwicklung und Fertigung,
- Refu – Umrichter und Batterietechnik,
- ifeu – Umweltaspekte,
- NTM und CTA – Feldtest.

2011.11 Einreichung der Projektskizze beim VDI/VDE für das BMU

2012.03 Vorhabensbeschreibung/Projektantrag – Zusage im Juni 2012

2012.05 Kooperationsvereinbarung mit den Projektpartnern

2012.06.01 Projektstart, geplantes Projektende 29. August 2015, 1. Konsortialtreffen (Paus) 2012-06-05

2012.08.15 2. Konsortialtreffen (Refu) –
Vorauslegung des Antriebsstrangs anhand verschiedener Terminals

2012.09.27 Arbeitstreffen Paus/Refu/Konecranes –
Batterie, Lenkung, Bremsen, E-Motor, Umrichter, Hydraulik, Klimaanlage, Sattelplatte, Aufstiege, SPS, Achsen, Batteriewechsel

2012.10.18 Telefonkonferenz Paus/Refu/Konecranes –
Zelltyp LFP oder NMC, Einbauräume im BTT

2012.10.30 3. Konsortialtreffen (NTM) –
Mindestbatteriekapazität wird auf 200kWh festgesetzt, weitere Überlegungen zum Batteriekonzept (Einbauräume), zeitliche Detailplanung einzelner Baugruppen

2012.12.11– 4. Konsortialtreffen (CTA) –
Festlegung auf die NMC-Zellen von Li-Tec

2013.03.07 5. Konsortialtreffen (Paus) –
Aktualisierung des Terminplans (Detailplanung), Batteriekonzept Refu, Zellen für den BTT (Li-Tec), Stand Konstruktion (Paus), Antriebstechnik/Steuerung (Konecranes), Verbrauchsberechnung (Konecranes)

2013.06.28 Arbeitstreffen Paus/Refu/Konecranes –
Stand der Konstruktion, Blockschaltbild, Antriebsmotor, Kühlung Antriebsmotor und –umrichter, Batterietrog, Verschaltung Batterietröge, Ladeinfrastruktur

2013.10.24 6. Konsortialtreffen (Konecranes) –
Umfangreiche Schnittstellenklärungen zwischen den Systemanteilen von Refu/Konecranes/Paus, Entscheidungen zu betrieblichen Auswirkungen und Straßenzulassung

2013.11.02 Treffen mit BGHW in Hamburg (BGHW, CTA, Paus, Konecranes) –
Abstimmung der geplanten Ausführung mit der BGHW zu den Themenschwerpunkten Ergonomie und Arbeitssicherheit

2014.03.31 Schwarzmontage bei Paus –
Die Vorstellung des Trucks im gegenwärtigem Montagezustand am Ende der „Schwarzmontage“, Erörterung von Schnittstellen und Zusammenarbeit bei der weiteren Montage, Erkennen eventuellen

Änderungsbedarfs



- 2014.06.18 Lieferung des Trucks von Paus an Konecranes für den Einbau der Batterien (Refu) und weiterer Systeme sowie die Inbetriebnahme
- 2015.01.08 Testfahrten durch CTA bei Konecranes – Das Fahrverhalten wurde insgesamt positiv bewertet, die Platzverhältnisse in der Kabine wurden als knapp genannt
- 2015.01.28 Validierung der Pneumatikbremse erfolgreich abgeschlossen (Paus, Knorr)
- 2015.07.01 BTT, Trailer und Ladecontainer wurden zum Start des ersten Feldtests ins Terminal von NTM in Neuss gebracht
- 2015.08.13 7. Konsortialtreffen (NTM) – Steuerungssoftware ist fertig (bis auf die Änderungen die durch weitere Batteriesoftware-Updates erforderlich werden), Parametrierung der Wechselrichter abgeschlossen (Wechselrichter des Fahrmotors kann/wird noch im Terminalbetrieb weiter optimiert), Fahrer Informationssystem (Displays) ist fertig (kann jedoch bei Bedarf um weitere Informationen erweitert werden), Betrieb mit Trailerbatterien erfolgreich getestet, Datalogger zeichnet sämtlichen CAN-Bus Datenverkehr auf
- 2016.01.06 Rückholung des BTT aus Neuss zu Konecranes, nachfolgend – Ausbau der REFU Batterien, Einbau der alternativen Batterien, Austausch DC/DC-Wandler, Umbau Geschwindigkeitserhöhung Sattelhubeinrichtung (Paus), Beginn der Inbetriebnahme der alternativen Batterien
- 2016.09.20 Rücksendung des BTT zu NTM



- 2016.12.07 8. Konsortialtreffen (NTM) – Probetrieb bei NTM grundsätzlich erfolgreich, nach einer Schicht waren noch ca. 45% SOC vorhanden, die Fahrer hatten sich schnell an die Nutzung des rekuperierenden Bremsens statt der Betätigung der Druckluftbremse gewöhnt, für den Übergang zu CTA wurden diverse Anpassungen besprochen, die bei Konecranes durchgeführt wurden bevor bei Paus die geplante Umrüstung auf die bei CTA erforderliche Bereifung durchgeführt wurde

2017.05.02 Versand und Übergabe des BTT an CTA –
Fahrschulungen, Fahren und Laden, bis 29.11. Feldtestbetrieb in Hamburg



2017.11.29 9. Konsortialtreffen (CTA), abschließendes Konsortialtreffen

2017.12.06 Rückholung BTT zu Konecranes nach Düsseldorf

3. Darstellung der Ergebnisse des Verbundprojekts gegliedert nach Arbeitspunkten

AP1 – Marktanalyse

- Erstellung eines Fragebogens o. Ä. zu den relevanten Einsatzbedingungen in Containerterminals und Industrieanwendungen
- Ergänzende Recherche zu Einsatz- und Umgebungsbedingungen

Weltweit sind mindestens 50.000 Terminaltrucks mit teilweisen Flottengrößen von 300 und mehr Fahrzeugen in einem Terminal im Einsatz. Etwa 5.000 Terminaltrucks werden jährlich weltweit als Neufahrzeuge benötigt. Die aktuellen Befragungen der Anwender haben ein sehr starkes Interesse der Betreiber an umweltfreundlicher Technologie bestätigt. Beispielsweise hat die Hutchison Port Holding (Terminalbetreiber u.a. Port of Felixstowe, Europe Container Terminals Rotterdam, ...) an alle seiner weltweit vorhandenen Terminals das Ziel der vollständigen Elektrifizierung ausgegeben. Selbst Betreiber von kleinen Flotten in Binnenterminals oder industriellen Anwendungen haben durch den in der Gesellschaft vorhandenen Druck zur Nachhaltigkeit, ein verstärktes Interesse an umweltfreundlicher Technologie.

Entscheidend für die Verwirklichung derartiger hochgesteckter Ziele wird allerdings die tragfähige Kombination aus Investitionskosten und der im Betrieb anfallenden Kosten sein. Ein mit einer Batterie ausgerüsteter Truck wird eine höhere Erstinvestition erfordern. Die Vorteile müssen sich also im Betrieb durch niedrigere Energiekosten (deutliche Wirkungsgradsteigerung) und verminderte Wartungskosten ergeben. Eventuelle längere technische Haltbarkeit eines elektrisch angetriebenen Gerätes wird von den Anwendern als nicht relevant bezeichnet. Zurzeit werden die Trucks nach 5 bis 7 Jahren ausgetauscht um auf neueste Technologie zugreifen zu können. Längere Verwendung eines elektrischen Trucks wird von den Anwendern nicht gewünscht. Bei einer längeren Laufzeit wird mit erhöhten Wartungskosten gerechnet da Bauteile wie z.B. Achsen und deren Aufhängung an ihre Nutzungsgrenzen kommen.

Ein Fragebogen im Excel-Format wurde an ausgewählte, potenzielle Kunden wie dem Port of Felixstowe und APMT, aber auch an kleinere Anwender (z.B. Nortrans, Papier- und Containerlogistik der Papierfabrik in Dörpen) und die Projektpartner (CTA/NTM) verschickt.

Ziel war die Ermittlung typischer Einsatzprofile mit Einsatzzeiten, Pausenzeiten, Produktivität, Kraftstoffverbrauch des Dieseltrucks, Fahrgeschwindigkeit, transportierte Lasten, Reparaturanfälligkeit, usw.

Aus den erhaltenen Antworten geht hervor, dass es keine einheitlichen, direkt konzeptionell umsetzbaren Einsatzbedingungen gibt (z.B. um die Batteriekapazität und die entsprechende Batterieladestrategie festzulegen). Die einzelnen Anwender unterscheiden sich in ihren Anforderungen erheblich. So gibt es Anwender, bei denen Pausenzeiten für die Truckfahrer in regelmäßigen Abständen vorkommen, die für ein Zwischenladen der Batterien genutzt werden können. Andere Anwender gaben die Auskunft, dass es in deren Betrieb keine Stillstands- oder Pausenzeiten gibt. Der überwiegende Teil der Anwender arbeitet im Mehrschichtbetrieb, sodass ein möglichst unterbrechungsfreier Betrieb der Fahrzeuge möglich sein muss. Das Auslegen der Batteriekapazität auf eine Schichtdauer (ca. 8 h) wird zwar angestrebt, ist allerdings aus betrieblichen Gründen nicht zwingend erforderlich.

Aus den Auswertungen geht hervor, dass mit einer Mindestlaufzeit, bis zum Nach- bzw. Zwischenladen oder zum Batteriewechsel, von wenigstens 4 Stunden kalkuliert werden muss, um einen produktiven Betrieb zu ermöglichen. Mit dieser Voraussetzung ist es voraussichtlich möglich, mit einem Großteil der potenziellen Kunden Einsatzstrategien zu erarbeiten, die die Verwendung des batteriegestützten Trucks in nahezu allen Anwendungen ermöglicht.

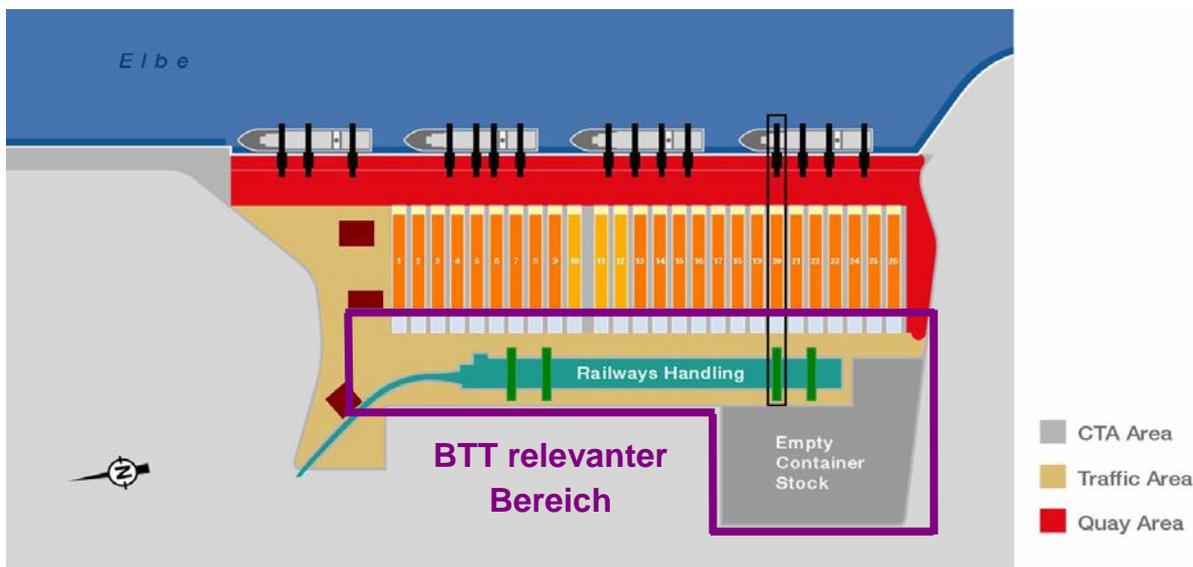
Für Terminaltrucks ergeben sich durch ihren weltweiten Einsatz, sehr große Unterschiede in den Einsatz und Umgebungsbedingungen. Haupteinsatzgebiet der Fahrzeuge ist der Seehafen, mit den dort typischen Bedingungen mit salzhaltiger Luft eingesetzt. Geht man in Europa von einem Temperaturbereich von -25°C bis 40°C aus, so ist in anderen Umweltzonen mit deutlich höheren Temperaturen oder auch erhöhter Luftfeuchtigkeit zu rechnen. Auswirkungen dieser klimatischen Bedingungen müssen später in der Serie durch verstärkte Kühlung der Antriebstechnik (Motor und Batterie) berücksichtigt werden. In mehr nördlichen Ländern sind auch niedrigere Minustemperaturen und die sich daraus ergebende Heizung der Batterie zur Kapazitätserhaltung und Ladefähigkeit in die Auslegung einzubeziehen.

Für die aktuelle Entwicklung des batteriebetriebenen Terminaltrucks genügt die Auslegung auf die in Deutschland üblichen Umgebungsbedingungen. Jedoch sind auch hier Heizung und Kühlung von Antriebsstrangkomponenten und der Batteriezellen je nach eingesetzter Technik erforderlich.

Neben der Analyse der Einsatzbedingungen wurden auf dem Markt befindliche Zugmaschinen hinsichtlich ihrer technischen Daten analysiert. Die dabei gewonnenen Informationen sind in die Anforderungen an den batterieelektrischen Terminal Truck eingeflossen.

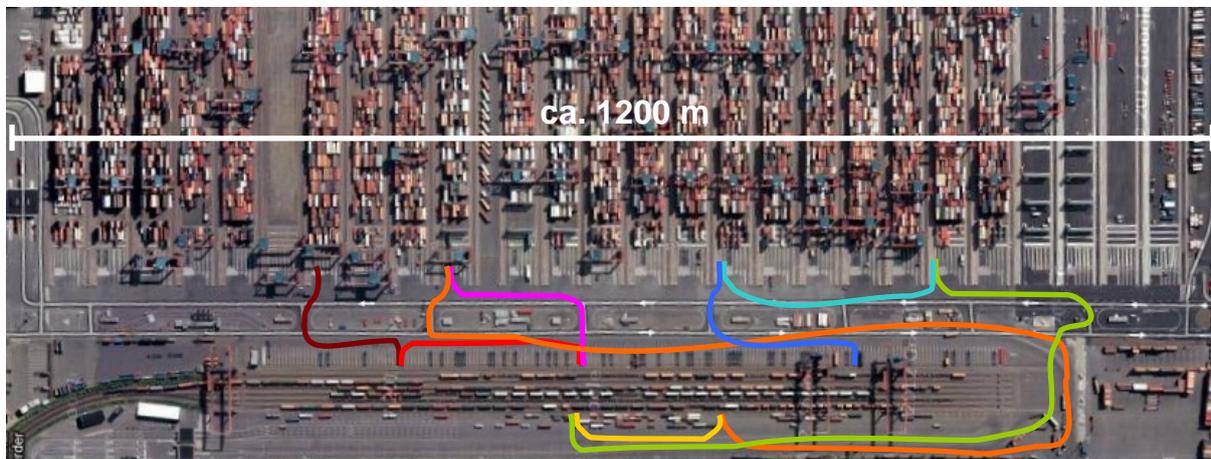
Beispielhaft sind hier die Betrachtungen wie sie für CTA durchgeführt wurden aufgeführt (von CTA zur Verfügung gestellt):

Um die in AP2 zu definierenden Anforderungen aufstellen zu können, ist zunächst einmal die genaue Kenntnis des bestehenden Einsatzprofils der bisher eingesetzten, dieselbetriebenen Terminal Trucks erforderlich. Das Terminalgebiet, in dem die Trucks eingesetzt werden, ist in der folgenden Abbildung für das Container Terminal Altenwerder (CTA) violett eingrahmt

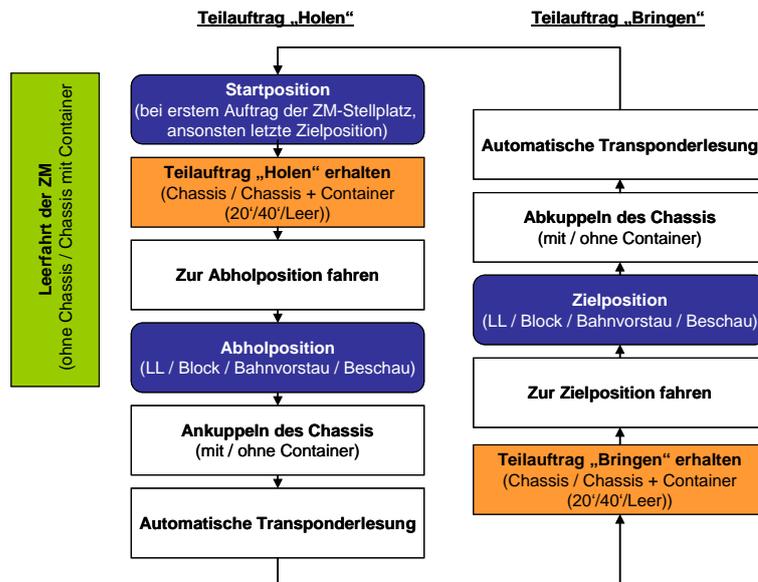


Im Rahmen des AP1 erfolgte im 3. Quartal 2012 eine genaue Untersuchung der Fahrprofile der bisherigen Trucks. Es konnten innerhalb dieses Gebietes drei typische, immer wiederkehrende Fahrauftragstypen identifiziert werden.

Das Gros der durch einen Terminal Truck zu bewältigenden Fahrten verteilt sich auf den Versand und den Empfang von Bahn-Containern. Die Terminal Trucks bilden die Verbindung zwischen dem Bahnvorstau am CTA-Bahnhof und dem CTA-Blocklager aus. Typische Fahrten dieser Art zeigt die folgende Abbildung.

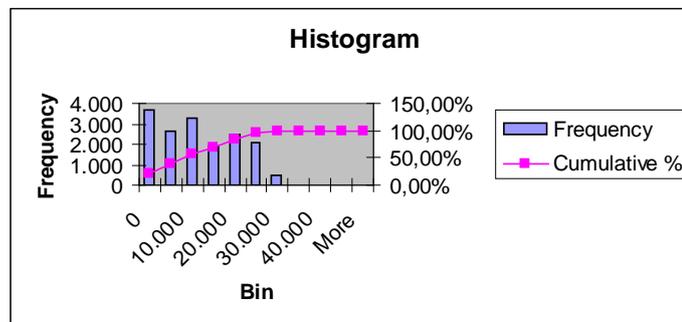


Die Fahrten konnten auf Prozesskettenebene in folgende Prozessschritte aufgeteilt werden.



Durch die Aufteilung in Prozessschritte war es möglich, die einzelnen Prozessschritte statistisch aufzugliedern. Dadurch ergaben sich genaue Aussagen, welche Prozessschritte wie lange dauern. Dies ist für die Formulierung von Anforderungen an den BTT besonders wichtig, denn aus den verschiedenen Fahrzeiten, An- und Abkuppelvorgängen und Wartezeiten lässt sich der Energiebedarf eines BTT prognostizieren. Die generierten Informationen wirken somit, bis in den Konstruktionsvorgang hinein. Neben den zeitlichen Formulierungen wurden auch Untersuchungen/Verifizierungen der zurückgelegten Fahrstrecken vorgenommen.

Weiterhin wurden die absolvierten Fahraufträge im Hinblick auf die zu bewältigenden Containergewichte analysiert. Auch dies hat direkte Auswirkungen auf den zu prognostizierenden Energieverbrauch eines BTT bzw. die Auslegung/Kapazität der benötigten Batteriekapazität. Die Verteilung der Containergewichte zeigt die folgende Grafik



Ergänzend wurden zudem die Anteile von Leer- zu Vollcontainern bestimmt, die durch die Terminal Trucks bewegt werden.

AP2 – Anforderungen

- Allgemeine Betriebsanforderungen (Fahrzeit, Einsatzzeit, Umgebung, etc.)
- Anforderungen an den batterie-elektrischen Antriebsstrang (Antriebsleistung, Geschwindigkeiten, etc.)
- Gruppierung und Dokumentation der Anforderungsklassen

Aus den Untersuchungen der verschiedenen Anwendungen ging hervor, dass es keine eindeutig definierbaren Anforderungen gibt, die für jeden Einsatzfall ohne Modifikation angewendet werden können.

Aus dieser Erkenntnis heraus wurden von der Projektgruppe Mindestanforderungen definiert:

- die Fahrzeit mit einer Batterieladung darf nicht weniger als 4 Stunden betragen,
- die höchstmögliche Geschwindigkeit wurde auf 35 km/h festgelegt, wobei in einigen Terminals (u.a. CTA und NTM) die Maximalgeschwindigkeit sogar auf 25 km/h begrenzt wird,
- hinsichtlich der Umgebungsbedingungen wird für die Entwicklung des BTT von den im nordeuropäischen Seehafen üblichen Umgebungsparametern ausgegangen, im Wesentlichen Temperaturbereich von -25°C ... 40°C, Arbeiten bis 10 Beaufort, bis zu 5% Bodenneigung, salzhaltige Luft,
- automatische Sattelkupplung,
- für den Sattelhub gilt ein Hubbereich von 550mm + Allgemeintoleranzen des Trucks,
- Der größtmögliche Wendekreis des BTT wird durch den möglichen Lenkwinkel der Vorderachse und den Achsstand des BTT festgelegt. Eine Untersuchung bei CTA und NTM hat ergeben, dass hier 14 bis 15m ausreichend sind. Üblicherweise haben Terminaltrucks kleinere Wendekreise, die Möglichkeiten in absolut kompatible Bereiche zu gelangen werden durch den Einbau des Batterietroges mit der angestrebten Kapazität und dem daraus folgenden Achsstand limitiert. Die endgültige Auslegung auf einen möglichst kleinen Wendekreis erfolgte durch Firma Paus in Abstimmung mit der Batterie der Firma REFU,
- Im Übrigen war die von CTA zur Verfügung gestellte Spezifikation des konventionellen Dieseltrucks maßgeblich, da Terminalzugmaschinen grundsätzlich mit einer kundenspezifischen Spezifikation beschafft werden (im Bild ist eine dieselbetriebene Terminalzugmaschine von CTA abgebildet).



Die CTA Zugmaschine ist eine typische Hinterlandzugmaschine mit einer Leistung des Dieselmotors von ca. 170 KW für den Transport von Containern auf ungebremsten Terminalchassis. Da eine Prototypzugmaschine in die bestehende Flotte zu integrieren war, war es besonders wichtig geforderten Funktionen und Geschwindigkeiten dem bestehenden Betrieb anzupassen. Um eine Istaufnahme der bestehenden Fahrzyklen, Einsatzzeiten, Energieeinsatz zu bekommen, wurden umfangreiche Daten aufgenommen und in ein Pflichtenheft übertragen. Hierzu ist es natürlich auch nötig, dass alle terminalspezifischen Sicherheitsanforderungen berücksichtigt werden.

Da die Maschine in dem erwarteten Testfeld auch im Bereich der Vorschriften der STVO fährt, muss der Ausrüstungsstand diesen Anforderungen weitgehend entsprechen. Dies betrifft nicht nur den Stand der Sichtverhältnisse und der Beleuchtung, sondern beispielsweise auch der Bremsleistung und Geschwindigkeiten bzw. Beschleunigungen.

Eine besondere Anforderung gegenüber anderen Anwendungen ist die besonders hohe Bremsleistung der Maschine, die durch den Betrieb mit ungebremsten Terminalchassis gefordert wird. Als Bremsverzögerung mit ungebremsten Trailer werden innerbetrieblich 2,4 m/s² erwartet und mit Zugmaschine ohne Trailer etwa 5 m/s².



CTA-Chassis zur Aufnahme von 20, 40, 45 ft Containern, 50 t

Anforderung an die Zugmaschine-Trailer-Einheit

Die Fahrzeuge sind bestimmt für den Transport von Containern der Reihe 1 nach DIN ISO 668, die im üblichen Hafenbetrieb anfallen und umgeschlagen werden:

1x 45'Container, 1x 40'Container, 1x 30'Container, 1x 20'Container, 2x 20'Container, 1x 20 ft Tankcontainer, 1x 20 ft Schwerlastflat, 1x 40 ft Schwerlastflat

Der Schwerpunkt eines beladenen Containers kann bei ungleichmäßiger Beladung außermittig bezogen auf die Containergrundfläche liegen und auch in der Höhenlage variieren. Der Richtwert für die außermittige Abweichung des Schwerpunktes ist mit $\pm 15\%$ der Containerlänge, -breite bzw. -höhe, bezogen auf die jeweilige Mittenposition der betreffenden Achse anzusetzen.

Sowohl die Standsicherheit und Tragfähigkeit als auch die Bremsanlage der Zugmaschine muss hierauf abgestimmt sein.

Die Zugmaschine ist uneingeschränkt für den Außeneinsatz (unter nordeuropäischen Bedingungen) im Hafenumschlagsbereich bestimmt. Negative Einflüsse auf die Funktionalität, bedingt durch extreme Witterungsverhältnisse (z.B. durch Schnee, Eis, Regen, Nebel, Wind) sind bei der Konzeption, Konstruktion und Fertigung sicher auszuschließen.

Temperaturbereich	-25° C bis +40° C
Korrosivitätskategorie (EN ISO 12944)/ Schutzdauer	C 3/ L
Bis 10 Beauforts ist ein Arbeiten möglich.	

Da die Terminallogistik eine Containerlagerung auf Trailern im Bereich der Bahnbe- bzw. -entladung vorsieht, ist nach jeder Teilstrecke ein Auf- bzw. Absattelvorgang enthalten. Dies ist besonders bei der Auslegung der Hydraulikanlage zu berücksichtigen.

Für die Verlegung der Hydraulikschläuche und deren Kennzeichnung gelten die Regeln der BGR 237 „Hydraulik-Schlauchleitungen- Regeln für den sicheren Einsatz“. Dies ist besonders wichtig, da die Maschinen in einem Gebiet mit besonderer Gewässergefährdung eingesetzt werden müssen.

Grundabmessungen und Geschwindigkeiten

Um in der bestehenden Flotte als Testmaschine mitfahren zu können sind bei den Grundabmessungen und Geschwindigkeiten folgende Mindestanforderungen nötig.

Radstand: möglichst 3.300 mm , was einem Wendekreis von 13 Metern entspricht.

Sattelkupplung: Hublast 34 t / 2" Kupplung

Höhe Sattelkupplung: ca 1.100 mm

Hubhöhe Sattelkupplung: ca. 500 mm

Gerätehöhe: ca 3.200 mm

Fahrgeschwindigkeit: 25 km/h

Anforderungen an die Kabine

Eine besondere Anforderung wird an die Ausgestaltung der Kabine in Bezug auf Rundumsicht und ergonomische Ausführung gestellt. Dies erfordert Scheiben aus Sicherheitsglas, sowie leicht zu öffnende Schiebefenster.



Als besonders wichtig wird ein luftgefederter Fahrersitz angesehen, der in der Lage ist das Fahrergewicht selbstständig auszugleichen. Weiterhin müssen eine ausreichende Beheizung, sowie eine Klimaanlage vorhanden sein. Die Kapazität der Heizung ist so auszulegen, dass bei 0° C Außentemperatur innerhalb von acht Minuten eine Innentemperatur von 20 ° C erreicht werden muss und auch bei Leerlauf des Fahrzeugs gehalten werden.

Bei der Klimaanlage, die bei einer voll verglasten Kabine und auf Grund von Betriebsvereinbarungen für den Betrieb am CTA unbedingt erforderlich ist, verhält es sich ähnlich. In einer vorgegebenen Zeit muss die Kabinentemperatur auf mindestens 10° C unter die Außentemperatur gebracht werden. Eine Luftfilterung der Kabinenluft wird als Stand der Technik vorausgesetzt.

Bei den vorhandenen dieselgetriebenen Zugmaschinen sind die Klimaanlagen mit den Türen und Fenstern logisch verknüpft. Bei geöffneten Fenstern bzw. Türen wird die Klimaanlage ausgeschaltet.

Da die Ausgestaltung des Arbeitsplatzes besonders entscheidend für die Akzeptanz der Maschine ist, müssen hier besondere Anstrengungen unternommen werden, um vergleichbare Bedingungen auch ohne zur Verfügung stehende Motorwärme bzw. vom Dieselmotor angetriebenen Klimakompressor zu schaffen.

In der Ausführung der übrigen Ausrüstung wie zum Beispiel Scheibenwischer, Rückspiegel und Arbeitslicht wird der neueste Stand der Technik erwartet. Dies bedeutet für das Arbeitslicht den Einsatz von LED Technik.

Obwohl die Geräuschquelle Dieselmotor in der geplanten Ausführung fehlt, müssen die Grenzwerte der Richtlinie „Lärm“ 2003/10/EG der Lärm- und Vibrations- Arbeitsschutzverordnung eingehalten werden.

AP3a - Forschung und Entwicklung Konzepte Terminal Truck

- Konzeption des Antriebsstrangs inkl. Nebenverbraucher
- Konzeption Blei-Säure-Batterie
- Schnittstellendefinition zwischen Terminal Truck Chassis, Batterie und Antriebsstrangkomponenten

Im Rahmen des Vorhabens wurden unterschiedliche Konzeptvarianten für den Antriebsstrang untersucht, die sich in erster Linie durch folgende Aspekte unterschieden haben:

- Art und Anzahl des Antriebsmotors
- Kopplung des Antriebsmotors mit der Achse
- Ausgestaltung der Hydraulik
- DC/DC-Wandler zwischen Batterie und Antriebsumrichter (j/n)

Das favorisierte Konzept hat die Eigenschaft, dass der Antriebstrang möglichst kompakt aufgebaut ist und möglichst wenige Energie übertragende Elemente (z.B. Schaltgetriebe, DC/DC-Wandler) eingesetzt werden. Damit wird angestrebt, eine höchst mögliche Energieeffizienz zu erreichen sowie Kosten und Bauraum einzusparen, um damit möglichst viel Raum für die Batterie zur Verfügung zu stellen. Hauptantrieb und Nebenverbraucher sollen nur dann zugeschaltet werden, wenn sie auch benötigt werden.

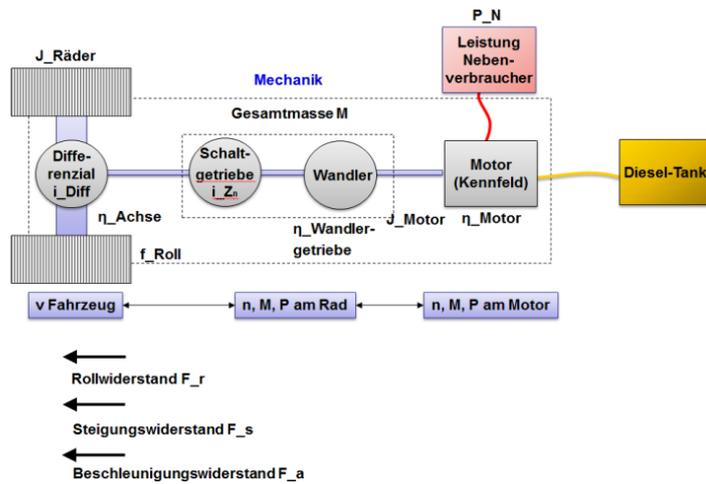
Um dieses Antriebsstrangkonzzept zu realisieren, ist eine sehr gute Abstimmung der Antriebsstrangkomponenten aufeinander erforderlich. Aus diesem Vorhaben heraus wurde der Antriebsstrang gemäß dem folgenden Blockschaltbild konzipiert, die REFU zugeordnete Li-Ion-Batterie wurde im Projektverlauf durch ein alternatives Batteriekonzept ersetzt (Projekterweiterung).

Die beiden Batterien (Lithium-Ionen-Batterie in der Zugmaschine und Blei-Säure-Batterie im Trailer) können wahlweise Verwendung finden. Es ist sichergestellt, dass immer nur eine der beiden Batterien dem Zwischenkreis zugeschaltet sein kann, da diese in einen auf Zwischenkreisseite gemeinsamen Steckverbinder umgesteckt werden. Die endgültige Auslegung wurde im Rahmen der weitergehenden Entwicklung festgelegt.

Die Blei-Säure-Batterie wurde so ausgelegt, dass sie bezüglich der Spannungslage und der entnehmbaren Ströme zur Li-Ion-Batterie kompatibel ist. Die Batterie wird im Pilotgerät nicht automatisch wechselbar sein, das Nachladen erfolgt direkt an der Batterie im Trailer. Dies stellte für den Feldversuch kein Hindernis dar, da hier der Trailer nicht regelmäßig verwendet werden sollte.

Für die weiteren Arbeitspunkte in diesem Arbeitspaket war es erforderlich, die Leistungsanforderungen an Batterie und Antriebsmotor sowie die für eine vorgegebene Einsatzzeit benötigte Batteriekapazität zu bestimmen. Aus diesem Grund wurde ein Simulationsmodell des Antriebsstrangs aufgebaut. Die dabei durchgeführten Tätigkeiten passen thematisch zum AP5a, das laut Vorhabensbeschreibung erst nach Meilenstein 1 angefangen werden sollte. Während der Projektbearbeitung hat sich jedoch herausgestellt, dass es sinnvoll war, diese Tätigkeiten vorzuziehen.

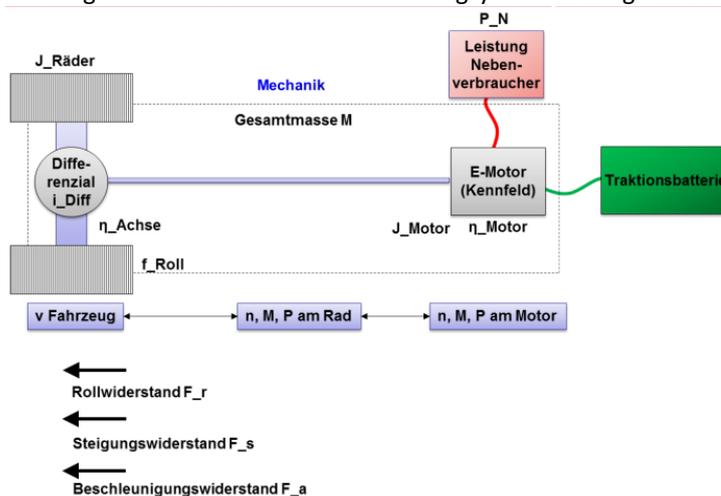
Vor Simulation des batterie-elektrischen Antriebsstrangs wurde ein Referenzmodell für einen Truck mit dieselmechanischem Antriebsstrang aufgebaut. Ziel war es, die mit dem Dieselmotor erzielbaren Beschleunigungsverläufe und Endgeschwindigkeiten für verschiedene Zuladungen zu berechnen, um diese als Referenz für die Auslegung des elektrischen Antriebs zu verwenden. Die folgende Abbildung gibt einen schematischen Überblick über das Simulationsmodell.



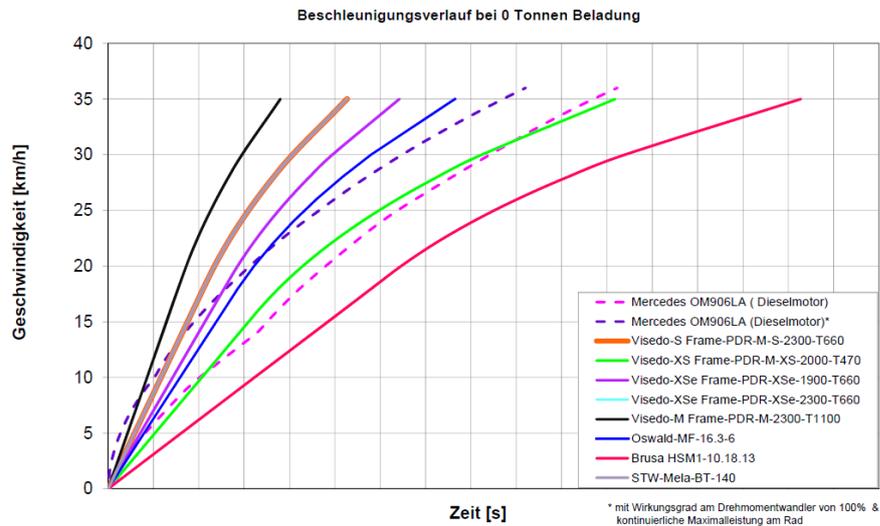
Der in der obenstehenden Abbildung gezeigte Strukturplan bezieht sich auf den Gesamtwiderstand und auf die Verluste einzelner Komponenten des diesel-mechanischen Antriebsstrangs. Es werden die maximale Beschleunigung, die dafür benötigte Zeit und die zurückgelegte Strecke über das durch den Dieselmotor und das Getriebe zur Verfügung stehenden Drehmoment errechnet. Das Modell ist rückwärts rechnend aufgebaut. In einem abgestuften Geschwindigkeitsbereich wird das Fahrzeug in 2km/h Schritten auf eine Endgeschwindigkeit von 36km/h mit dem maximal zur Verfügung stehendem Drehmoment beschleunigt.

Über die Gesamtgetriebeübersetzung und die aus der Geschwindigkeit resultierenden Radrehzahl wird die Motordrehzahl ermittelt. Mit der errechneten Motordrehzahl wird über die Motorkennlinie des Dieselmotors das Drehmoment im Volllastbereich abgegriffen. Dabei wird das Drehmoment absichtlich nur über die Volllastkennlinie abgerufen, da die minimalen Beschleunigungszeiten ermittelt werden sollen, um den elektrischen Antriebsmotor darauf auszulegen. Die mechanische Motorleistung ist die Ausgangsgröße mit der die Beschleunigung ermittelt wird. In einer Fahrwiderstandsgleichung werden die wesentlichen Einflüsse des Leistungsbedarfs für den Vortrieb des Nutzfahrzeuges ermittelt. Generell ist die Leistung bei Geradeausfahrt durch Gesamtwiderstand und die Fahrgeschwindigkeit bestimmt. Der Gesamtwiderstand wird durch die Beschleunigungskraft, den Rollwiderstand und den Steigungswiderstand definiert. Der Luftwiderstand ist bei einer maximalen Geschwindigkeit von 35 km/h vernachlässigbar.

Das Modell zur Untersuchung der Beschleunigungscharakteristik eines batterie-elektrisch betriebenen Sattelschleppers ist dem Aufbau der Modellstruktur des diesel-mechanisch getriebenen Antriebsstrangs sehr ähnlich. Wie in der untenstehenden Abbildung ersichtlich ist, wird der Verbrennungsmotor durch einen E-Motor ersetzt und der Kraftstofftank gegen eine Traktionsbatterie getauscht. Auf Grund des hohen Bemessungsdrehmoments von Elektromotoren, welches von Beschleunigungsanfang bis Bemessungsdrehzahl konstant vorhanden ist und abgegriffen wird, können der Drehmomentwandler und das Schaltgetriebe komplett entfallen und der E-Motor wird direkt an das Differential in der Hinterachse angeflanscht. Sonst wird am Fahrzeugsystem nichts geändert.

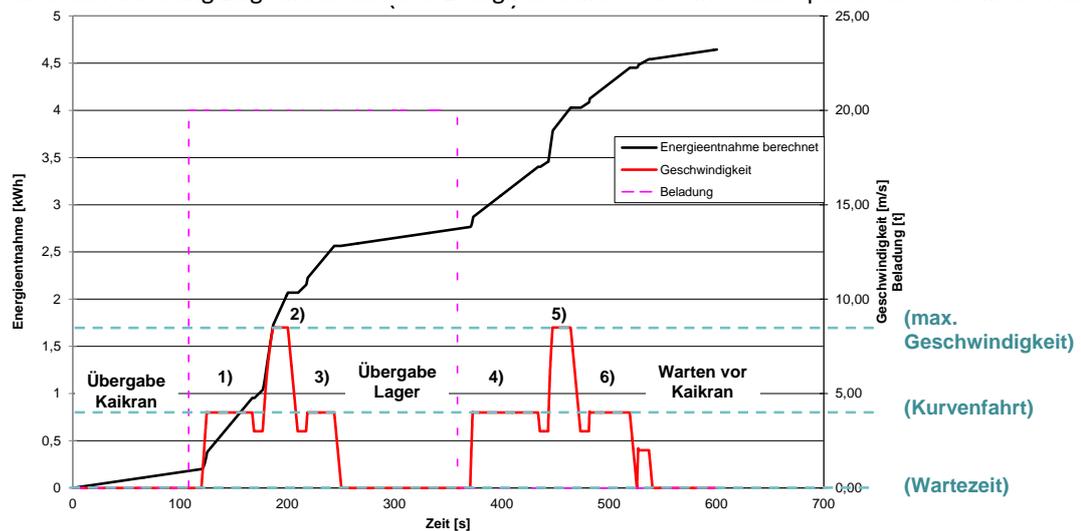


Die Referenzwerte für das Anfahrverhalten des Dieseltrucks wurden mit den erreichbaren Werten verschiedener Elektromotoren bei verschiedenen Zuladungen verglichen:



Auf dieser Basis konnte eine erste Dimensionierung der elektrischen Antriebsmaschine und der entsprechenden Umrichter erfolgen. Die dabei ermittelten Motorleistungen und die erzielbaren Beschleunigungen wurden im Folgenden verwendet um die elektrischen Energieverbräuche für die in AP1 ermittelten Fahrzyklen für typische Terminal Truck Anwendungen zu ermitteln.

Die untenstehende Abbildung zeigt die elektrische Energieentnahme für einen exemplarischen Terminal Truck Einsatz.



Mittels der Simulationsergebnisse wurde die untenstehende Tabelle aufgestellt. Hier werden die Unterschiede der verschiedenen Anwendungen hinsichtlich Fahranteilen und Energieverbrauch deutlich. NTM und CTA (siehe hierzu auch die Beschreibung von CTA in AP1) unterscheiden sich von den typischen TT/RTG Großterminals dadurch, dass hier unterschiedlichste Bewegungen stattfinden und ein Fahrzyklus über einen längeren Zeitraum dargestellt werden muss um ein realistisches Abbild des Einsatzes zu erhalten. Typische Abbilder für ein TT/RTG Terminal sind die Terminals in Felixstowe und Algeciras. Die Vorauslegungen haben ergeben, dass eine nutzbare Batteriekapazität von 150 kWh bis 200 kWh für die meisten Anwendungen ausreichend ist.

	Terminal 1 (D)	Terminal 2 (D)	Terminal 3 (GB)	Terminal 4 (E)	Terminal 5 (D)	Terminal 6 (MAL)
Verhältnis Fahranteil/ Stillstand	64%/36%	76%/24%	50%/50%	42%/58%		54%/46%
Zykluszeit	1343s	1435s	600s	600s		600s
Zyklen/Stunde	2,7	2,5	6	6		6
Maximale Geschwindig- keit	25km/h	25km/h	35km/h	35km/h	35km/h	35km/h
Energie- entnahme/ Stunde	27,6kW	29,9kW	27,6kW	24,6kW		42,6kW
Fahrstrecke pro Zyklus	3224m	3638m	1293m	1006m		1686m
Batterie- nutzungszeit für 200kWh	7,3h	6,7h	7,2h	8,2h		4,7h

Die Simulationsuntersuchungen ermöglichten eine Vordimensionierung der Antriebskomponenten und der Batterie. Diese Informationen waren Voraussetzung für die Bauraumkonzeption des Trucks.

Zur Klärung der Konzeptfragen wurden von Paus unterstützend neun Entwurfsalternativen für den Truck und verschiedene Arten unterschiedlicher Batterie- und Batteriewechselkonzepte in Verbindung mit dem Fahrgestell ausgearbeitet.

Basierend auf den unterschiedlichen Eigenschaften der Lösungsvarianten wurde im Rahmen der technisch-wirtschaftlichen Bewertung eine Auswahl der aussichtsreichsten Variante vorgenommen.

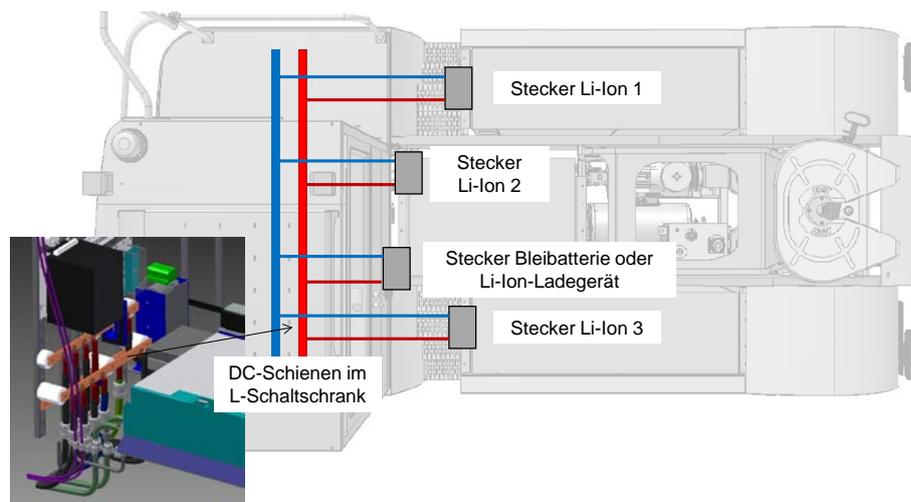
Die Mitwirkung der Terminals an diesem AP umfasste die gemeinsame Diskussion zwischen den Konsortialpartnern zu Einsatzkonzepten. So zeigen sich interessante Möglichkeiten zur Nutzung einer relativ kleinen Batteriekapazität (für 5-6 h durchschnittlichen CTA-Terminalbetrieb) in Kombination mit dem Schichtplanmodell des CTA, wodurch in verschiedenen betrieblichen Pausen die Batterie durch Schnellladungen stets wieder soweit aufgeladen werden könnte, dass trotzdem die Arbeitslast einer kompletten Schicht gewährleistet werden kann.

Ebenso ist das grundlegende Batteriekonzept des Terminal Truck (BTT) festgelegt worden (Abbildung). Um eine möglichst hohe Batteriekapazität im Bauraum unterbringen zu können, wurde die Batterie in drei Teile aufgeteilt (weiße Volumenkörper). Der Antriebsmotor sitzt im hinteren Bereich des Chassis und treibt direkt die Hinterradachse an. In diesem Zusammenhang war zu berücksichtigen, dass die Bildung der Batterien aus einzelnen Zellmodulen an Systemmaße der Zellmodule gebunden ist und somit nur Rastermaße möglich sind. Die Aufgabe bestand darin, eine optimale Lösung zu finden zwischen angestrebter Batteriekapazität (somit Zellenzahl), weiteren Gesichtspunkten der Batteriegestaltung wie hauptsächlich den Platzbedarfen für Einrichtungen zur thermischen Konditionierung der Batterie und für das Batteriemanagementsystem sowie den nötigen mechanischen Trag- und Gehäusestrukturen, dem Bauraum für die Batterien im Terminal Truck, der Platzierung weiterer Maschinenbestandteile und -aggregate, der funktionsgerechten Gestaltung des Fahrzeugrahmens, den Maschinenabmessungen, ihrem Wendekreis und der Zugänglichkeit der Batterien und ihrer Servicepunkte. Hierzu wurde eine Vielzahl von Varianten und Kombinationen untersucht und aus ihnen die optimale Variante hergeleitet. Diese besteht aus drei quaderförmigen Batterietrögen, wobei der mittlere kleiner ist und die beiden äußeren, seitlich eingebauten spiegelbildlich gleich sind.

Auch die oberhalb beschriebene erste Dimensionierung von elektrischer Antriebsmaschine und Umrichtern als weitere Maschinenbestandteile und -aggregate sowie nachfolgende Konkretisierungen flossen in intensiver Zusammenarbeit der beteiligten Partner in den Iterationsprozeß zur Ableitung der optimalen Lösungsvariante ein.



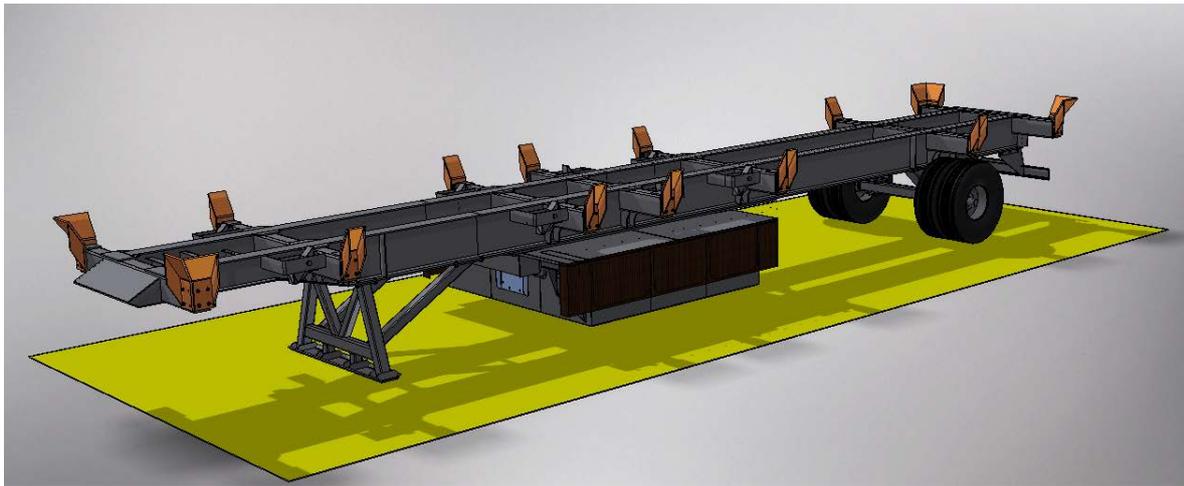
Um die Batterien mit dem elektrischen Zwischenkreis des Fahrzeugs verbinden zu können, wurde entschieden, jede der drei Teilbatterien mit einer separaten Steckverbindung auszustatten. Ein vierter Stecker dient dazu, entweder das Ladegerät oder die Blei-Säure-Traktionsbatterie im Trailer anzuschließen. Auf Grundlage dieses Konzepts wurden die genauen Anforderungen an die Steckverbinder definiert. Neben den Leistungskontakten, muss der Stecker auch über Signalkontakte für die CAN-Bus-Kommunikation und über Pilotkontakte verfügen. Die Stecker Li-Ion 1 bis 3 bleiben im normalen Betrieb gesteckt und werden nur benötigt, wenn die Batterie aus dem Fahrzeug herausgenommen wird.



Die Leistungsverorgung der Nebenverbraucher wurde ebenfalls im Laufe dieses Berichtszeitraums in einigen Details optimiert. So wurden beispielsweise die Hydraulikpumpe und der Kompressor zu einer Einheit zusammengefasst um eine kompakte Bauform zu realisieren und einen Antrieb einzusparen.

Im Rahmen des AP3a wurde ein Konzept ausgearbeitet, um eine Blei-Säure-Batterie in einem Trailer hinter dem eigentlichen Terminal Truck unterbringen zu können. Die Batterie besteht aus 8 einzelnen 80 V Batterieblöcken mit 500 Ah Kapazität, die in einem Wechselrahmen angeordnet werden. Der Wechselrahmen ist stark an die Konstruktion angelehnt, die in den Konecranes Batterie-AGV eingesetzt wird. Die Batterieblöcke werden in Reihe geschaltet, wodurch eine Nennspannung von 640 V bei einer Nennkapazität von 500 Ah zur Verfügung steht. Es wird davon ausgegangen, dass unter normalen Betriebsbedingungen eine Energiemenge von ca. 250 kWh aus der Batterie entladen werden kann.

Die Bleibatterie wurde unter den Trailer gehängt und mit dem oben genannten Stecker an den Zwischenkreis des Fahrzeugs angeschlossen werden. Neben den Leistungskontakten stehen ein CAN-BUS-Verbindung und Pilotkontakte zur Verfügung. Zwischen Batterie und Stecker werden ein Schütz und eine Absicherung untergebracht.



Energiesimulation und Analyse des Energieverbrauchs

Es wurde ein Längsdynamikmodell für den Antriebsstrang des BTT aufgebaut und Simulations-untersuchungen bzgl. der benötigten Fahrleistung und dem Energieverbrauch des BTT durchgeführt. Mit Hilfe dieses Modells wurden verschiedene Terminalsituationen tiefergehend analysiert. Die Abbildung gibt eine Übersicht über die simulierten Fahrprofile von verschiedenen Terminals. Die Fahrprofile bilden jeweils einen typischen Transportzyklus ab.

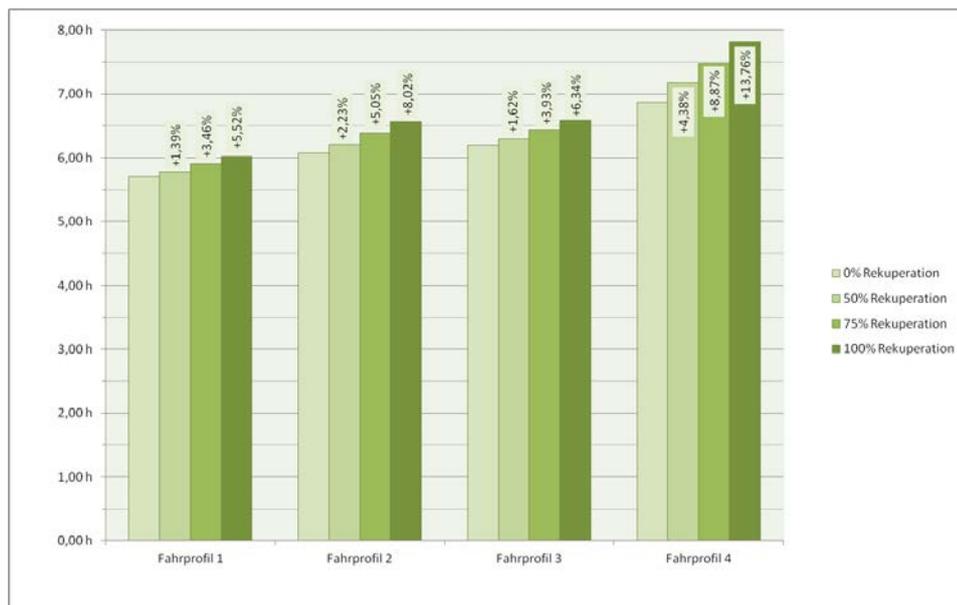
	Zyklusstrecke	Zykluszeit	Zeitanteile			
			Beschleunigung	Bremmung	Konstantfahrt	Leerlauf
Fahrprofil 1 CTA	3638 m	1435 s	44 s (3 %)	92 s (6 %)	953 s (66 %)	346 s (24 %)
Fahrprofil 2 POF	1293 m	600 s	24 s (4 %)	38 s (6 %)	238 s (40 %)	300 s (50 %)
Fahrprofil 3 NTM	3224 m	1344 s	40 s (3 %)	83 s (6 %)	739 s (55 %)	481 s (36 %)
Fahrprofil 4 Algeciras	1006 m	600 s	24 s (4 %)	43 s (7 %)	183 s (31 %)	350 s (58 %)

Für die Auswertung der Nutzungsdauer wurde die voraussichtlich verfügbare Energiemenge der Li-Ion-Traktionsbatterie von 167 kWh durch die entnommene Energie pro Zyklus dividiert und am Ende mit der Zykluszeit multipliziert. Einen wesentlichen Einfluss auf die Nutzungsdauer des BTT hat der Anteil der verfügbaren Bremsenergie, der in die Batterie rekuperiert werden kann. Dieser Wert hängt nicht nur von der eingesetzten Technik ab sondern auch vom Verhalten des Fahrers (ausrollen vs. starke Verwendung der mechanischen Bremse). Der Rekuperationsanteil wurde zwischen 0% und 100% variiert, um den Einfluss zu quantifizieren. 100 % bedeutet, dass die vollständige Bremsenergie abzüglich der Energie, die während des Bremsvorgangs durch die Nebenverbraucher verwendet wird und abzüglich der Energie, während des Bremsvorgangs durch die Fahrwiderstände verloren geht, in die Batterie zurückgespeist wird. Dabei werden auch Wirkungsgradverluste in Motor, Umrichter und Batterie berücksichtigt. 50% bedeutet, dass nur die Hälfte der verfügbaren Bremsenergie in die Batterie zurückgespeist wird, der Rest wird entweder durch die mechanische Bremse in Wärme umgewandelt oder im elektrischen Zwischenkreis über Widerstände abgebaut. Je nach Fahrverhalten wird geschätzt, dass zwischen 50% und 75% der verfügbaren Bremsenergie in der Praxis zurückgespeist werden kann.

Die Ergebnisse werden in den nachstehenden Abbildungen dargestellt.

	Energieentnahme pro Zyklus			
	0% Rekuperation	50% Rekuperation	75% Rekuperation	100% Rekuperation
Fahrprofil 1	11,67 kWh	11,51 kWh	11,28 kWh	11,06 kWh
Fahrprofil 2	4,58 kWh	4,48 kWh	4,36 kWh	4,24 kWh
Fahrprofil 3	10,06 kWh	9,90 kWh	9,68 kWh	9,46 kWh
Fahrprofil 4	4,05 kWh	3,88 kWh	3,72 kWh	3,56 kWh

	Errechnete Nutzungsdauer pro Batterieladung			
	0% Rekuperation	50% Rekuperation	75% Rekuperation	100% Rekuperation
Fahrprofil 1	5,70 h	5,78 h	5,90 h	6,02 h
Fahrprofil 2	6,08 h	6,21 h	6,38 h	6,56 h
Fahrprofil 3	6,20 h	6,30 h	6,44 h	6,59 h
Fahrprofil 4	6,87 h	7,17 h	7,48 h	7,82 h



Je nach Rekuperationsanteil und Fahrprofil wird erwartet, dass durch die Rückspeisung von Bremsenergie die Nutzungsdauer pro Batterieladung zwischen ca. 3% und 9% erhöht werden kann. Erwartungsgemäß ist der Nutzen der Rekuperation dann besonders hoch, wenn im Betrieb viele kurze Strecken mit häufigen Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen vorkommen. Solche Fahrprofile werden in Containerterminals erwartet, bei denen der Terminal Truck für den Transport von Containern zwischen Kaikran und Lager eingesetzt wird. Dies ist eine der Hauptanwendungen.

Neben dem Einfluss der Rekuperation wurde der Einfluss von weiteren Einflussgrößen auf den Energieverbrauch mittels der Simulation ermittelt. Ein wesentliches Optimierungspotenzial wird darin gesehen, den Rollwiderstand des Fahrzeugs zu verringern, z.B. durch die Verwendung von Leichtlaufträgern. Je nach Fahrprofil ergaben sich bis zu 15% längere Nutzungsdauern.

Weiterhin wurde der Einfluss der Höchstgeschwindigkeit auf den Energieverbrauch des BTT untersucht. Die maximale Geschwindigkeit wurde dabei zwischen 15 und 35 km/h variiert. Interessanterweise sinkt der Energieeinsatz pro Transportvorgang (nicht pro Zeit) wenn mit einer höheren Geschwindigkeit gefahren wird. Dies kann damit begründet werden, dass der Nebenverbrauch pro Transportvorgang geringer ist, wenn der Transportvorgang schnell abgeschlossen werden kann. Der Energieverbrauch für die Überwindung der Fahrwiderstände bleibt hingegen nahezu gleich, da die relevanten Fahrwiderstandskomponenten nicht geschwindigkeitsabhängig sind. Der Luftwiderstand spielt

in diesem Geschwindigkeitsbereich eine untergeordnete Rolle. Dieses Ergebnis gilt allerdings nur dann, wenn keine zusätzlichen Beschleunigung- und Abbremsvorgänge erforderlich sind.

Im Folgenden werden die wesentlichen Potenziale zusammengefasst, den Energieverbrauch zu reduzieren:

- Reduzierung des Rollwiderstands
- Rekuperation, Nutzung des E-Motors zum Abbremsen
- Verwendung von energieeffizienten Antriebsstrangkomponenten
- Reduzierung des Nebenverbrauchs
- Energieeffiziente Batterie- und Ladetechnik
- Zügiger Transport der Container bei gleichzeitiger Vermeidung unnötiger Beschleunigung- und Abbremsvorgänge

AP3b - Forschung und Entwicklung Batterielade- und -wechselstrategien

- Entwicklung geeigneter Batterielade- und Wechselkonzepte
- Energiesimulation verschiedener Terminalsituationen
- Konzeption einer geeigneten Ladeinfrastruktur
- Analyse des Energieverbrauchsmodells

Entwicklung geeigneter Batterielade- und Wechselkonzepte

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden zunächst allgemeine Möglichkeiten für das Batteriewechseln bzw. -laden erarbeitet:

- Konzept I (Fahrzeugtausch)
- Konzept II (Zwischenladen in Betriebspausen)
- Konzept III (Batteriewechsel)
- Konzept IV (Einschichtbetrieb, Laden über Nacht)

Die vielversprechendsten Varianten sind folgende:

Konzept I (Fahrzeugtausch)

- Batterien sind fest im Fahrzeug installiert
- Kein Wechsel der Traktionsbatterie
- Bei einer Restkapazität von 20% wird das Fahrzeug aus dem aktiven Betrieb genommen und geladen
- Fahrer wechselt bei der Ladestation sein entladenes Fahrzeug gegen ein geladenes Fahrzeug
- Entscheidung wird entweder vom Fahrer getroffen oder von der Leitzentrale (Batterieverwaltungssystem) angeordnet, wann geladen werden soll
- Bei kleinem Verhältnis von Lade- zu Einsatzzeit interessant, da dann nur wenige Zusatzfahrzeuge erforderlich sind.
- Vorteile: Einfache Positionierung der Batterie im Fahrzeug; keine besondere Infrastruktur für den Batteriewechsel; geringe betriebliche Ausfallzeiten
- Nachteile: Kosten Zusatzfahrzeuge; erforderlicher Stellplatz für Zusatzfahrzeuge; schnellladefähige Batterien erforderlich

Konzept II (Zwischenladen)

- Batterien sind fest im Fahrzeug installiert
- Kein Wechsel der Traktionsbatterie
- Geladen wird während betriebsbedingter Standzeiten
- Laden erfolgt über Ladestationen mit oder ohne Kabel (z.B. Induktionsflächen im Boden), die sich in der Nähe der Pausenräume befinden
- Vorteile: Einfache Positionierung der Batterie im Fahrzeug; keine besondere Infrastruktur für einen Batteriewechsel; keine betrieblichen Ausfallzeiten

- Nachteile: Nur bei bestimmten Anwendern möglich; schnellladefähige Batterien erforderlich; hohe Leistungsanforderungen an Ladeinfrastruktur, da alle Batterien innerhalb kurzer Zeitfenster geladen werden müssen (oder entsprechende Schichtung der Pausenzeiten)

Konzept III (Batteriewechsel)

- Batterien sind am Fahrzeug wechselbar montiert
- Bei einer Restkapazität von unter 20 % wird die Traktionsbatterie gegen eine voll aufgeladene Batterie getauscht
- Entscheidung wird entweder vom Fahrer getroffen oder von der Leitzentrale (Batterieverwaltungssystem) angeordnet, wann geladen werden soll
- Laden findet außerhalb des Fahrzeuges statt
- Vorteile: Entkopplung vom Fahr- und Ladebetrieb; kurze betriebliche Ausfallzeiten; bei großen Flotten ist der Platzbedarf für Ladestation deutlich kleiner als der Platzbedarf für Konzepte I und II; längere Ladezeitpunkte sind akzeptabel; Ladezeitpunkte können anhand energetischer und betrieblicher Kriterien optimiert werden (z.B. Laden mit Nachtstrom)
- Nachteile: Batterie muss wechselbar gestaltet sein; Fahrzeug muß über entsprechende Einrichtungen verfügen, die mehr Bauraum beanspruchen und das Fahrzeuggewicht und die Fahrzeugkosten erhöhen; Infrastruktur für Batteriewechsel erforderlich;

Eine Auswahl der geeignetsten Strategie kann nicht pauschal festgelegt werden, sondern muss individuell für jeden Anwender untersucht werden. Die Batterie des prototypischen Terminal Truck soll sowohl schnellladefähig als auch mit einfachen Mitteln wechselbar sein, sodass keine Einschränkung bzgl. der oben genannten Konzepte besteht.

Es wurde festgestellt, dass das geeignete Batterielade- und Wechselkonzept von dem jeweiligen Einsatz und den örtlichen Gegebenheiten abhängt. Aus Sicht von CTA zeigen sich interessante Möglichkeiten zur Nutzung einer relativ kleinen Batteriekapazität (für 5-6 h durchschnittlichen CTA-Terminalbetrieb) in Kombination mit dem Schichtplanmodell des CTA, wodurch in verschiedenen betrieblichen Pausen die Batterie durch Schnellladungen stets wieder soweit aufgeladen werden könnte, dass trotzdem die Arbeitslast einer kompletten Schicht gewährleistet werden kann (Konzept II).

Um von vornerein keine Einschränkung zu schaffen, wurden folgende Anforderungen an die Batterie- und Ladetechnik des BTT-Prototyps gestellt:

- Batterien sollen Schnellladefähig sein
- Möglichst große Batteriekapazität
- Batterien sollen für einen Batteriewechsel von oben aus dem Truck herausgehoben werden können.

Konzeption einer geeigneten Ladeinfrastruktur

In den beiden Terminals NTM und CTA wurde der BTT mit seiner Li-Ion-Batterie eingesetzt. Zusätzlich kann bei NTM der Trailer mit der Blei-Säure-Batterie eingesetzt werden. Um beide Batterietypen verwenden zu können, sind sowohl Blei-Ladegeräte als auch ein Li-Ion-Ladegerät zu verwenden. Zur Umsetzung der beiden Konzepte wurde ein bestehender 20' Container ausgewählt, der bereits Blei-Ladegeräte eingebaut hat. Zusätzlich wurde in diesen Container noch das Ladegerät und dessen Kühlung für die Li-Ion-Batterie installiert. Die Verkabelung wurde so vorgenommen, dass wahlweise die Blei-Säure-Batterie im Trailer oder die Li-Ion-Batterie im BTT geladen werden konnten.

Ausführungsdetails sind im Abschnitt zum AP5c dargestellt.

AP4 - Technisch-wirtschaftliche Bewertung

- Darstellung der Konzepte und deren Eigenschaften
- Bewertung der Konzepte aus Herstellersicht
- Bewertung und Auswahl des endgültigen Fahrzeugkonzepts

Während des Projektverlaufs wurde der aktuelle Entwicklungsstand regelmäßig aus technischer sowie wirtschaftlicher Sicht bewertet. Auf dieser Grundlage wurden beispielsweise in den Arbeitspaketen „AP3a - Forschung und Entwicklung Konzepte Terminal Truck“ sowie „AP3b - Forschung und Entwicklung Batterielade- und -wechselstrategien“ mögliche technische Lösungen beleuchtet und ausgewählt.

Nach Umsetzung und Erprobung des BTTs konnte eine abschließende technische Bewertung durchgeführt werden. Die Ergebnisse hierzu sind im Abschnitt „AP8 – Testbetrieb CTA / Neuss Trimodal“ dargestellt.

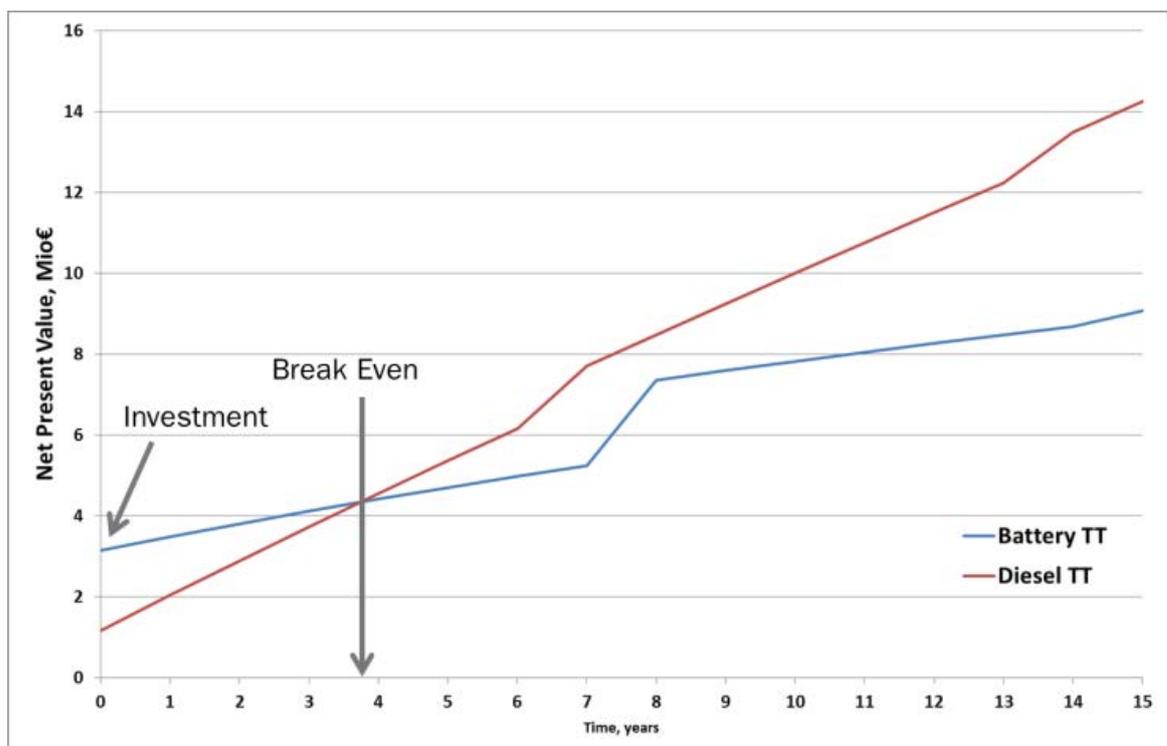
Die ersten wirtschaftlichen Bewertungen wurden bereits in der frühen Projektphase durchgeführt. Viele damals noch abgeschätzte Eingabedaten konnten im Projektverlauf deutlich genauer bestimmt bzw. gemessen werden, sodass die wirtschaftliche Bewertung regelmäßig aktualisiert werden konnte. Wesentliche Eigenschaften sind z.B.: Batterie- und Fahrzeugkosten, Energieverbrauch und Einsatzzeiten, Ladezeiten sowie Wartungskosten.

Die Kosten für Fahrzeug- und Batterien können nach Aufbau des Prototyps deutlich besser eingeschätzt werden als zu Projektbeginn, wobei von einer gewissen Kostenoptimierung für ein Seriensystem gegenüber dem prototypischen Aufbau ausgegangen wird.

Die Wartungskosten wurden zusammen mit NTM und CTA bestimmt. Diese sind für einen Diesel-Trucks genau bekannt. Durch eine Analyse der dabei zu wartenden Komponenten konnte eine Abschätzung getroffen werden, dass die Wartungskosten bei einem BTT um rund 35% niedriger liegen werden.

Weitere wichtige Eigenschaften (Energieverbrauch, Einsatzzeiten, Ladezeiten) konnten direkt im Testbetrieb gemessen werden.

Das nachfolgende Diagramm beruht auf neuesten Erkenntnissen, auch hinsichtlich vorteilhafter Preisentwicklung bei Li-Ion-Batterien. Durch Einbeziehung der Ergebnisse des Feldtests, z.B. günstigen realen Energieverbräuchen, konnte die nachstehende, für den BTT positive, finale Betrachtung aus wirtschaftlicher Sicht erstellt werden.



Zusammenfassend ergab die Bewertung, dass die technische Machbarkeit des Vorhabens nachgewiesen werden konnte und deutliche Potenziale hinsichtlich eines umweltverträglichen Containertransports bietet. Bezüglich der Wirtschaftlichkeit wurden noch weitere Einsatzszenarien untersucht, die sich bezüglich der Flottengröße, der Fahrprofile, der jährlichen Betriebsstunden und der möglichen Ladestrategien unterscheiden. Die Projektpartner waren sich einig, dass unter gewissen Randbedingungen ein wirtschaftlicher Einsatz eines batteriebetriebenen Terminal Trucks durchaus möglich ist.

Eine zukünftige Herausforderung wird es sein, die Investitionen für ein Serienfahrzeug soweit zu reduzieren, dass der Anfangsinvest kein wesentliches Hemmnis für die Anschaffung darstellt und kurze Break Even Zeiten im Vergleich zu diesel-betriebenen Fahrzeugen in möglichst vielen Anwendungen erzielt werden.

AP5a - Forschung und Entwicklung Antriebsstrang

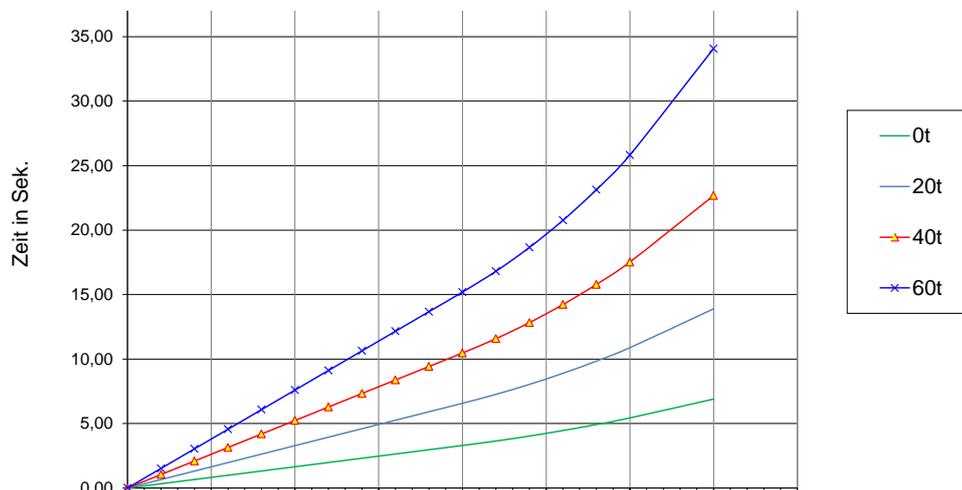
- Modellierung und numerische Berechnung des Antriebsstrangs
- Erarbeitung und simulative Untersuchung von Fahrstrategien
- Auslegung und Spezifizierung der Antriebsmotoren und weiterer Antriebsstrangkomponenten
- Festlegung der Leistungsdaten in Abhängigkeit der Gesamtanforderung und der einzuhaltenden Normen sowie sonstigen Anforderungen an das Gerät (Schutzart, Schwingungen, Stöße, Einbauart, Kühlart, etc.)

Der Arbeitspunkt 5a war von der Zeitplanung erst für die Phase II vorgesehen, im Zuge der Abarbeitung zeigte sich jedoch, dass es sinnvoll ist, diesen Punkt vorzuziehen, um die Auslegung des Trucks auch in Hinblick auf die Konstruktion rechtzeitig voranzutreiben. Die hierzu durchgeführten Arbeiten sind in den vorhergegangenen Abschnitten beschrieben.

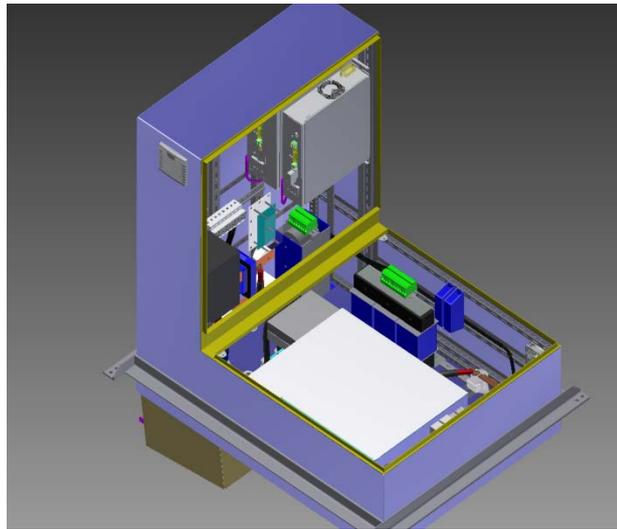
Auslegung und Spezifizierung der Antriebsmotoren und weiterer Antriebsstrangkomponenten

Im Rahmen des ersten Berichtszeitraums wurde durch Konecranes ein numerisches Simulationsmodell des Antriebstrangs erstellt, mit dem verschiedene Antriebsmotoren berechnet wurden.

Auf dieser Basis erfolgte zu Beginn dieses Berichtszeitraums die endgültige Dimensionierung und Auswahl des Antriebsmotors. Hierbei erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit der Firma REFU um die Randbedingungen der Umrichter und der Batterie zu berücksichtigen und die leistungselektronischen Komponenten auszuwählen.



Es erfolgte die konstruktive Umsetzung des Leistungsschalterschanks, der alle wesentlichen leistungselektronischen Komponenten beinhaltet. Der Schaltschrank hat eine L-förmige Gestalt und wird in die Rückwand bzw. den Boden der Fahrerkabine integriert, wodurch eine kompakte Bauform ermöglicht wird. Die Integration des Leistungsschalterschanks in die Fahrzeugkabine erfolgte in enger Zusammenarbeit mit PAUS im Rahmen der Entwicklung der Kabine.



Nach der Festlegung der Anschlusspunkte im Leistungsschaltschrank konnten die Kabelwege zu den Batterien, den Haupt- und Nebenantrieben sowie zu der Fahrzeugsteuerung festgelegt werden. Weitere Tätigkeiten im Rahmen dieses Arbeitspakets waren die Folgenden:

- Schnittstellendefinition Leistungselektronik - Steuerung - Fahrzeugelektrik
- Erstellung von Single-Line-Stromlaufplänen
- Erstellung von Stromlaufplänen und Anpassung an die Fahrzeugelektrik von PAUS
- Konzeptionierung der SPS Strukturen und Strukturierung des SPS-Programms
- Konzeptionierung der Visualisierung und Erstellung von Visualisierungsbildern zur Anzeige der Betriebsdaten
- Festlegung von Bezeichnungsstrukturen der Variablen in der SPS
- Programmierung des Grundgerüsts des SPS-Programms
- Festlegung der Kommunikationswege zwischen Leistungselektronik und Batteriemangement
- Optimierung der Hardwareschnittstellen im Bereich der Leistungselektronik (Wechselrichter, Batterien, Motore).
- Auswahl der Elektro-Komponenten und Erstellung der Elektro-Stücklisten
- Optimierung der Schrank-internen Kabelführung und Auswahl geeigneter Leitungen
- Einstellung der Steuerungskonfiguration und der Kommunikationsparameter

Tätigkeiten PAUS

Untersuchungsgegenstand war zum einen der unmittelbare Antriebsstrang des Fahrtriebstranges. In gemeinsamer Bearbeitung mit den Arbeitspunkten AP5b und AP5c wurden im ständigen Austausch mit den Projektpartnern Konecranes und Refu die wechselseitigen Beeinflussungen verschiedener Realisierungsansätze von Fahrmotor, Batterietechnik sowie Fahrzeuglayout und -komponenten untersucht. Die Drehzahlen und Drehmomente als Leistungsdaten sowie Bauraum- und Kühlsystemanforderungen verschiedener Fahrtriebstrangmotoren wurden in ihrer Wechselwirkung mit der als Triebachse wirkenden Hinterachse, ihren Übersetzungsverhältnissen und Lasttragfähigkeiten untersucht. In diese Untersuchungen wurden von Paus weiterhin die fahrwerkstechnische Kopplung von Hinterachse und Chassis, die Funktion der Hinterachs-Luftfederung, die Bauraumanforderungen der Hinterachs-Bremskomponenten (siehe auch zu AP5c) sowie Reifenbauart und -größe einbezogen. Hinsichtlich der Reifen galt es zur Erfüllung des Lastenheftes, den Konflikt zwischen ausreichender Tragfähigkeit von Eigengewicht und 36 t Sattelast einerseits und Einhaltung der niedrigen Unterfahrhöhe von 1100 mm andererseits zu lösen.

Es zeigte sich, dass eine Lösung nur bei integrativer Betrachtung des beschriebenen Systems in seiner Gesamtheit zu finden war. Im Ergebnis stellt die Planetengetriebeachse Typ D81PL478 des Achsherstellers Kessler hier die Entwicklungslösung dar. Um ein weites Spektrum der Marktanforderungen abdecken zu können, sind hier im Sinne eines modularen Lösungskonzeptes weiterhin zwei unterschiedliche Reifengrößen mit unterschiedlichen Tragfähigkeiten ausgewählt worden, jeweils mit angepassten, austauschbaren Kotflügeln.

Der zweite wesentliche Entwicklungsgegenstand unter diesem Arbeitspunkt war der Antriebsstrang für die Nebenantriebe. Da diese nicht wie sonst üblich von Nebenabtrieben des Dieselmotors angetrieben werden können, mussten hierfür neue Lösungen erarbeitet werden. Dieser Antriebsstrang wurde zusammen mit den Projektpartnern in seiner Gesamtheit von den Batterien über die Weiterleitung und Umformung der elektrischen Energie, ihre Wandlung

in mechanische Energie und die weitere Wandlung in fluidische Druckenergie betrachtet. Für die Luftfedern und die Fahrzeugbremse wird Druckluft benötigt. Für die Lenkung und das Heben der Sattelplatte wird ölhydraulischer Druck benötigt.

Als Ergebnis konnte eine sehr kompakte Antriebslösung für den erforderlichen Kompressor und die erforderliche Pumpe entwickelt werden, bei dem nur ein einziger Elektromotor Pumpe und Kompressor antreibt. Die Unabhängigkeit war unter dem Aspekt der Energieeffizienz besonders wichtig, weil die Leistungsanforderungen des Druckluft- und des Hydrauliksystems zeitlich schwanken und kein Zusammenhang zwischen dem pneumatischen und dem hydraulischen Leistungsbedarf besteht. Der Leistungsbedarf des Elektromotors wiederum passt sich dem Leistungsbedarf von Kompressor und Pumpe an, wodurch die Effizienz erreicht wird.

Weiterhin wurde durch die Optimierung des Fahrzeug-Gesamtlayout erreicht, das Aggregat zusammen mit dem Hydrauliktank, der Druckluftaufbereitung und dem Fahrantriebsmotor im Bauraum unter der Hubschwinge der Sattelplatte zu integrieren. Diese Lösung trug mit zur Reduzierung des Wendekreises gegenüber dem Zustand im Konzeptstadium (AP3a) bei (vergl. hierzu die Ausführungen zu AP5c).

Alle elektrischen Schnittstellen wurden als Teil der F&E-Arbeiten zum Antriebsstrang zeitgleich konkretisiert. Im Rahmen der Erarbeitung eines Steuerungskonzepts wurden ausgehend vom Blockschaltbild die elektrischen Schnittstellen, die benötigten Funktionen und alle Steuer- und Schaltsignale definiert. Gleiches gilt für die Leitungen zur elektrischen Leistungsübertragung. Diese Arbeiten bildeten die Basis für Arbeitspunkt 5c.

Im Besonderen fiel hier die Integration der zu den Antriebssystemen gehörenden Leistungselektronik in das Fahrzeug ins Gewicht. Neben einer Platzierung, die den erforderlichen Schutzanforderungen und dem erforderlichen Zugang für Wartungs- und Reparaturzwecke Rechnung trägt, stellte auch hier wieder die platzsparende Anordnung eine besondere Herausforderung an die Fahrzeugentwicklung.

Nachdem es dem Projektpartner Konecranes für seinen Arbeitsanteil gelungen war, die erforderlichen Kühlkomponenten für Leistungselektronik und Fahrantriebsmotor in einem einzigen Kühlsystem zu integrieren, konnten nahezu alle Systemkomponenten zusammen mit der Vorderachse im Bereich unter der Fahrzeugkabine integriert werden.

AP5b - Forschung und Entwicklung Batterietechnik (Bericht der Fa. REFU)“

- Abstimmung der mechanischen und elektrischen Schnittstellen zwischen Batterietrog und Fahrzeug
- Auslegung und Auswahl Blei-Säure-Batterie mit Ladetechnik
- Erarbeitung einer Ladeinfrastruktur für Blei-Säure-Batterie

Für die Entwicklung eines batteriebetriebenen Terminals Trucks und dessen Erprobung erhielt REFU im Rahmen des Verbundprojekts die Verantwortung geeignete Lösungen für die Batterie- und Ladetechnik sowie die erforderliche Antriebstechnik im Fahrzeug zu entwickeln. Diese mussten den speziellen Anforderungen beim Containerumschlag gerecht werden.

Dabei stellte sich vor allem die Entwicklung einer leistungsfähigen Batterie, die sowohl einerseits die technischen Notwendigkeiten wie bspw. Zyklfestigkeit und Energiedichte als andererseits auch die preislichen Vorstellungen erfüllt, als die größte Herausforderung dar. Im Nachgang zur Festlegung auf eine NMC-Batterie des Zellherstellers Li-Tec stellte sich widererwartend heraus, dass das zugehörige Battery Management System (BMS) nicht eingesetzt werden kann. Dementsprechend war es erforderlich, entgegen der ursprünglichen Projektplanung, ein eigenes BMS zu entwickeln. Neben der grundsätzlich schwierigen Verfügbarkeit sorgte dieser zusätzliche Aufwand für einen erheblichen Projektverzug seitens REFU.

Die thermische Konditionierung der Batterie wurde durch eine aktive Flüssigkeitskühlung bzw. -heizung realisiert. Damit sollte schon im Hinblick auf einen späteren weltweiten Einsatz eine lange Lebensdauer der Batterie trotz unterschiedlichster Temperaturbedingungen sichergestellt werden. Das zusätzliche Klimasystem erhöhte angesichts des begrenzt zur Verfügung stehenden Bauraums die Komplexität der mechanischen Konstruktion. Bei der Inbetriebnahme und im Testbetrieb zeigte sich, dass dies zu Lasten der Servicefreundlichkeit ging.

Anlässlich des Verzugs wurden die Teilbatterien umgehend nach der jeweiligen Fertigstellung des Aufbaus zur Inbetriebnahme des Fahrzeugs geliefert. Ein Test und eine Symmetrierung hinsichtlich des Spannungsniveaus konnte mit dem Gesamtsystem daher nicht durchgeführt werden. Dieser Umstand beeinträchtigte die Inbetriebnahme und den Testbetrieb. Vor allem die Kommunikation der Teilbatterien untereinander sowie zum Fahrzeug mit der entsprechenden Störbehandlung war ein Aspekt, der sukzessive verbessert werden musste. Der Ausgangszustand mit sehr unterschiedlichen Ladezuständen der Teilbatterien konnte ebenfalls beseitigt werden. Hierfür wurde extra ein spezieller Lademechanismus implementiert. Allerdings führten u.a. auch Schadensfälle dazu, dass die Gesamtbatterie nie über einen längeren Zeitraum einheitlich im Einsatz war und vor allem längerfristig geladen werden konnte.

Diese Situation ergänzt um den Umstand, dass die gewählten Batteriezellen aufgrund einer Produktionsaufgabe des Herstellers nicht länger verfügbar waren, führte dazu, dass sich die Projektpartner im Rahmen des Projektes für den Einsatz und die Qualifikation einer alternativen Batterie entschieden haben.

Reibungslos hingegen lief die Entwicklung der Leistungselektronik des Fahrzeugs für Fahrtrieb und Nebenaggregate und des Ladegeräts. Sowohl beim Wechselrichter für den Fahrmotor als auch beim Ladegerät wurde ebenfalls auf eine Flüssigkeitskühlung gesetzt, um eine kompakte Bauform mit entsprechend hoher Leistungsdichte ermöglichen zu können. Mit einer Ausgangsleistung des Ladegeräts von über 220kW war es so möglich, die Batterie schnell nachzuladen und für eine hohe Verfügbarkeit des Fahrzeugs zu sorgen. Darüber hinaus wurde das Ladegerät im Sinne einer schlüsselfertigen Lösung als abgeschlossene Einheit samt aller notwendigen Zusatzkomponenten wie Drossel und Filter entwickelt. Das vereinfachte die mechanische und elektrische Integration des Ladegeräts in das System aus Ladecontainer, Batterie und Fahrzeug.

Optimiert wurde das System während des Testbetriebs noch im Hinblick auf Visualisierung für den Hafenbetreiber. Darüber hinaus bot das Ladegerät eine offene und flexible Schnittstelle, um im späteren Projektverlauf auch die Batterie eines anderen Herstellers laden zu können. Vor diesem Hintergrund konnten sowohl die Antriebs- als auch die Ladetechnik für den Einsatz in mobilen, batterieelektrischen Containertransportfahrzeuge qualifiziert und wertvolle Erkenntnisse für einen späteren Serieneinsatz des Ladegeräts gewonnen werden.

Die Aufgaben der REFU Elektronik GmbH im Rahmen des Verbundprojektes „Terminal Trucks“ finden sich in den nachfolgenden Arbeitspaketen wieder:

- AP5a – F&E Antriebsstrang
- AP5b – F&E Batterietechnik
- AP6 – Aufbau
- AP7 – Versuchsprogramm und Inbetriebnahme
- AP8 – Testbetrieb

Ein deskriptiver Bericht über die einzelnen Arbeiten und Ergebnisse in den Jahren 2012 bis 2017 findet sich auf den nachfolgenden Seiten.

1. Auslegung einer Lithium Traktionsbatterie

1.1. Zelltyp

Der Forderung nach kompakter Bauweise entsprechen gemäß unserer Recherche Zellen in Pouch oder in prismatischer Bauform.

Auswahl der möglichen Zellchemie / des Zellherstellers

Im Markt der Lithiumzellen sind Lithium Eisen Phosphat Zellen (LFP) die Zellen, welche von vielen Herstellern angeboten werden, in Relation zu andere Zellchemie preisgünstig sind, eine hohe relative Sicherheit aufweisen und eine akzeptable Zyklenfestigkeit besitzen.

In die Betrachtung wurde auch die prognostizierte Steigerung der Zyklenfestigkeit in Richtung 4000 Zyklen bei kleinen Ladeströmen einbezogen. Dazu wurden LFP Entwicklungstrends für das erste Halbjahr 2013 in Richtung modifizierter Elektrolyte und in Richtung einer Reduzierung des Kohlenstoffanteils der Anode berücksichtigt.

Neben den LFP Zellen sollte wegen des geringen verfügbaren Bauraums und des geringeren Gewichts noch eine weitere am Markt verfügbare Lithium Technologie mit höherer Energiedichte zum Vergleich herangezogen werden. Ausgewählt

wurden Nickel Mangan Cobalt Zellen (NMC) mit einer patentierten keramischen Separatorfolie mit hohem Sicherheitsstandard.

Die spezifizierten Zellen wurden bei Automotive Projekten von Mercedes Benz eingesetzt. Verwendet wurden Module bestehend aus 31 Zellen getragen in Kunststoffrahmen in serieller Verschaltung. Die Kühlung erfolgt auf beiden Ableiterseiten durch einen Flüssigkeitskühlkörper. Das Modul hat damit eine nominale Spannung von 112V und eine Kapazität von 50Ah, was einer Energie von 5.600 Wh entspricht.

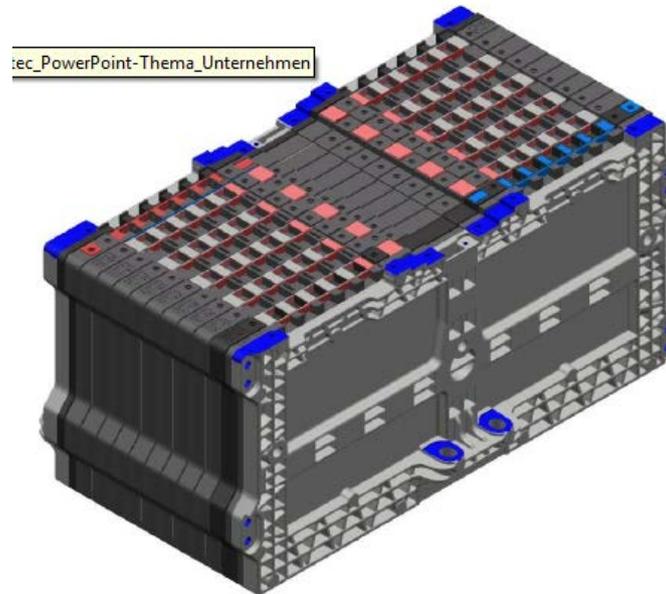


Abbildung 1: Prinzipskizze Modulaufbau

1.2. Sicherheit der Zellen

Die LFP Technologie weist seitens der Chemie die geringste Gefährlichkeit (DSC siehe unten) auf.

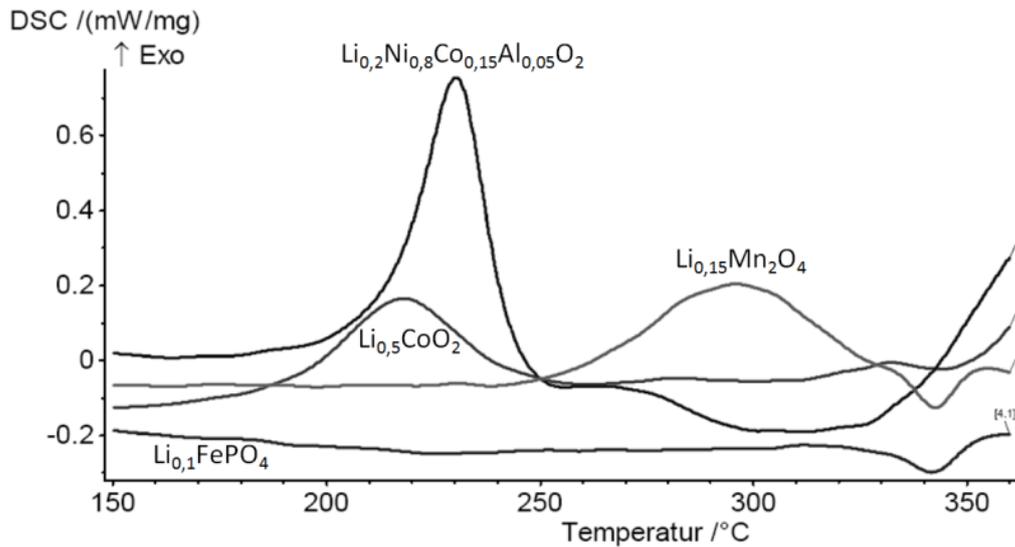


Abbildung 2: Dynamische Differenzkalorimetrie (engl.: DSC)

Die Li-Tec Zelle liegt im Bereich erhöhter exothermer Energiefreisetzung und muss deshalb mittels des keramischen Separators bei hohen Temperaturen stabil gehalten werden. Unabhängig davon muss das Batterie Management System (BMS) für die Einhaltung der zulässigen Betriebsparameter der Zelle sorgen.

1.3. Batterieauslegung

Für die Auslegung der Batterie wurde mit den Hafentreibern eine alternative Betrachtung von 8 Stunden Nutzungsdauer im Vergleich zu 4h Nutzungsdauer diskutiert. Der Ladevorgang sollte innerhalb einer Stunde abgeschlossen sein.

Tabelle 1: Gegenüberstellung verschiedener Batterien

	Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4
	LFP (Standard)	LFP (Schnellladung)	Pouch (Standard)	Pouch (Schnellladung)
Zelltyp	400Ah prismatisch	200Ah prismatisch	50Ah Pouch NMC	50Ah Pouch NMC
Zellanzahl	200	200	1032	516
Zellanordnung	200S0P	200S0P	2 x 172S3P	172S3P
Energie berechnet	256 kWh	128 kWh	186 kWh	92.8 kWh
Energie entnehmbar	179.2 kWh	89.6 kWh	186 kWh	92.8 kWh
U (nom./ min./ max.)	640 / 500 / 720V	640 / 500 / 720V	620 / 516 / 722V	620 / 516 / 722V
Entladen / Laden	1C / 0,3C (400A/120A)	2C / 2C (400A/400A)	1C / 0,3C (300A/90A)	2C / 2,5C (300A/375A)
Energiedurchsatz	179.2 x 4000 = 716.800 kWh	89.6 x 3000 = 268.800 kWh	186 x 7000 = 1.302.000kWh	92.8 x 4500 = 417.600kWh

Spalte_1: Gerechnet ist eine LFP Zelle mit einer Kapazität von 400Ah.

Die Verschaltung 200S0P sagt aus, dass 200 Zellen seriell verschaltet sind, eine Parallelschaltung von Zellen erfolgt nicht.

Die entnehmbare Energie errechnet sich aus der nominalen Energie multipliziert mit der Entladetiefe von max. 80%.

	In der Spalte Entladen/Laden bedeutet 1C, dass mit einem Strom entladen wird, welcher der Nominalkapazität der Zelle entspricht, also 400 Ampere. Energiedurchsatz ist $179.2 \text{ kWh} \times 4000 \text{ Zyklen} = 716.800 \text{ kWh}$. Diese Zahl ist theoretisch und kann von aktuellen LFP Zellen noch nicht erreicht werden. Der Preis von 400€ ist ein in Stückzahlen erreichbarer Marktpreis.
Spalte_2:	Dieselbe Berechnung für eine Batterie mit Schnellladung (2C). Die Zyklenzahl geht bei dieser Beanspruchung deutlich zurück.
Spalte_3:	Li-Tec Pouch Zelle in Verschaltung 172 Zellen seriell und 3 Zellen parallel. Dieser Aufbau dann wiederum 2 x parallel (2 x 172S3P). Die Schaltung erhöht die Kapazität der Batterie auf insgesamt 300Ah.
Spalte_4:	Schnellladung (2,5C).
Anmerkung:	Die absolute Höhe der Zusatzkosten steht in diesem Stadium des Projektes nicht fest. Die Kosten für die Batteriecontainer und die Kühlung sind, da noch keine Daten bestimmt wurden, nicht enthalten.

Aus den Projektgesprächen heraus wurde eine Entscheidung für die Pouchzelle getroffen. Grundlage war die kompakte Bauform und die hohe Zyklenfestigkeit bei einem attraktiven Preis pro kWh.

Abweichend zu obiger Darstellung wurde für das mechanische Design und für die weitere Bearbeitung eine Batterie mit 167 kWh Energie definiert.

1.4. Aufbau der Batterie

6 Module ergeben in serieller Verschaltung eine nominale Spannung von 660V (110V / Modul).

Erforderliche Kapazität:

$167.000 \text{ Wh} / 660\text{V} \geq 250 \text{ Ah}$ Mit 50Ah pro Zelle müssen fünf Zellen parallel verschaltet werden.

1.5. Konzept Modularer Aufbau der Batterie

1.5.1. Ausfallsicherheit

Für eine hohe Ausfallsicherheit ist die Batterie in mehrere parallel geschaltete Batterieblöcke mit voller Betriebsspannung unterteilt. Bei Ausfall einer Teilbatterie kann diese überbrückt werden und das Fahrzeug kann mit der restlichen Batterie weiterbetrieben werden.

Jede Teilbatterie ist mit dem vollen Strom abzusichern und ist über eine Relais Schaltung (Battery Disconnect Unit = BDU) zu oder abschaltbar.

1.5.2. Kühlkonzept

Jedes Modul ist komplett geschlossen aufgebaut, die Schutzart soll IP6K9 betragen. Die Kühlart innerhalb der Module ist eine Flüssigkeitskühlung auf Wasser Glykol Basis. Nach außen werden Anschlüsse für Kühlung, DC Anbindung und Bus-, Versorgungsschnittstelle gelegt. Das Gehäuse soll thermisch isoliert sein und für Luftdruckschwankungen ein Ausgleichselement aufweisen. Die Kühlflüssigkeit soll in einem externen Wasser Luft Wärmetauscher gekühlt werden. Für den späteren Einsatz in heißen Klimaregionen soll ein Betrieb mit Chiller vorgesehen werden.

Für den Winterbetrieb und für das Laden bei Temperaturen unter Null soll eine Beheizung vorgesehen werden. Beim Laden kann die notwendige Energie von der Ladestation bezogen werden. Im Betrieb muss die Energie der Batterie entnommen werden. Für die Beheizung und Kühlung sind Energie sparende Verfahren vorzusehen. Problematisch ist die Aufwärmung einer kalten Batterie aus tiefen Temperaturen unter Null, weil bedingt durch diese Temperaturen die Kapazität der Batterie bis auf 50% des Nennwertes reduziert werden kann. Deshalb ist eine externe Beheizung ggf. auch mit Hilfe einer Diesel Standheizung als praktikable Lösungen zu betrachten.

1.5.3. Wartung

Große Beachtung soll beim Batteriedesign auch der einfachen Reparatur von Batteriemodulen zu kommen. Ein einfacher Austausch von defekten Modulen muss gewährleistet sein. Aus Platzgründen muss die Batterie in bis zu 3 Bauräume aufgeteilt werden. Auch diese Teilbatterien müssen mit Kran oder Stapler bewegbar und leicht wechselbar sein.

1.6. Mechanisches Konzept

1.6.1. Verfügbare Bauraum im Truck

Der aus der Diskussion für die Batterie zur Verfügung stehende Bauraum in der Sattelzugmaschine (PAUS/KONECRANES) ist in der nachfolgenden Skizze ersichtlich. Innerhalb dieses Bauraums sollen sich die Batterie-Container der Batterie bzw. der Batterieblöcke befinden.

Aufgrund der Dimensionen des Batteriepacks ist ein einteiliger Batterie-Container nur sehr schwer händelbar. Deshalb wurde der Batterie-Container in drei Batterie-Container aufgeteilt.

Zwei jeweils außerhalb und einer innerhalb der Streben. Damit die einzelnen Batteriecontainer auf die Sattelzugmaschine gesetzt werden können, befinden sich an der Oberseite Kranösen. Die Batterie-Container werden mit den Streben des Fahrzeuges verschraubt.

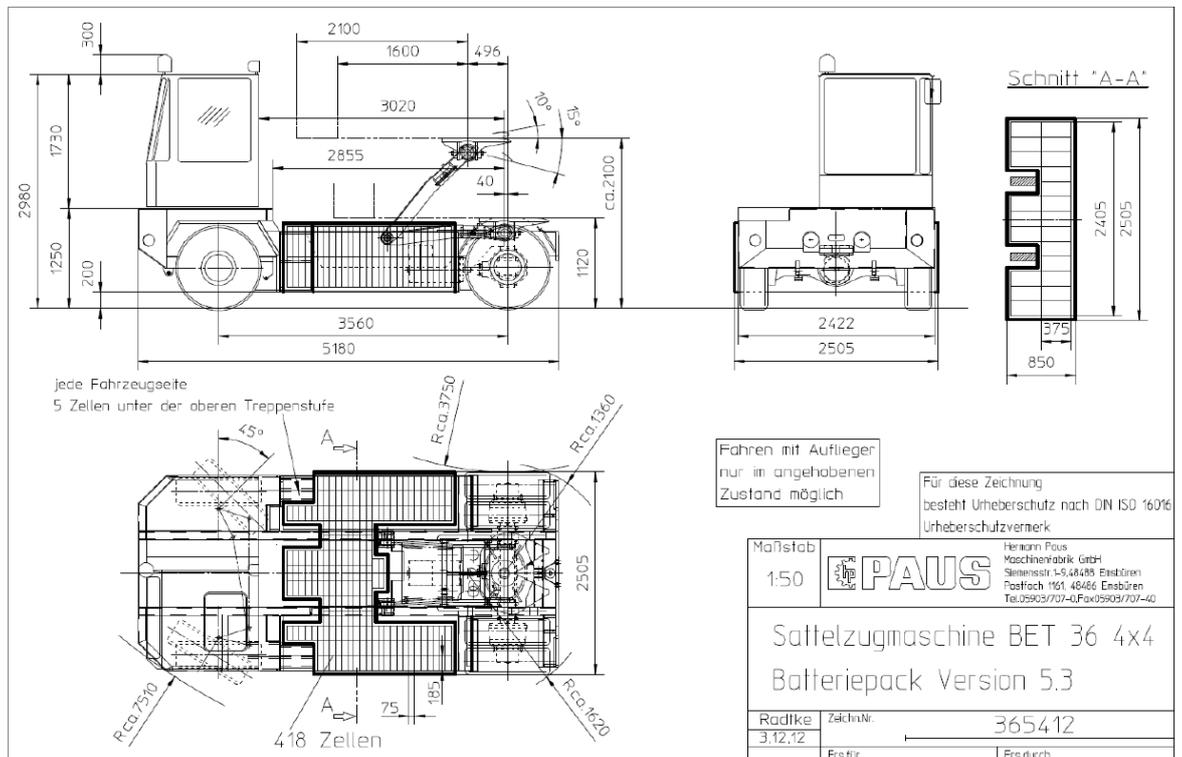


Abbildung 3: Abmessungen der Sattelzugmaschine

1.6.2. Aufteilung im Fahrzeug

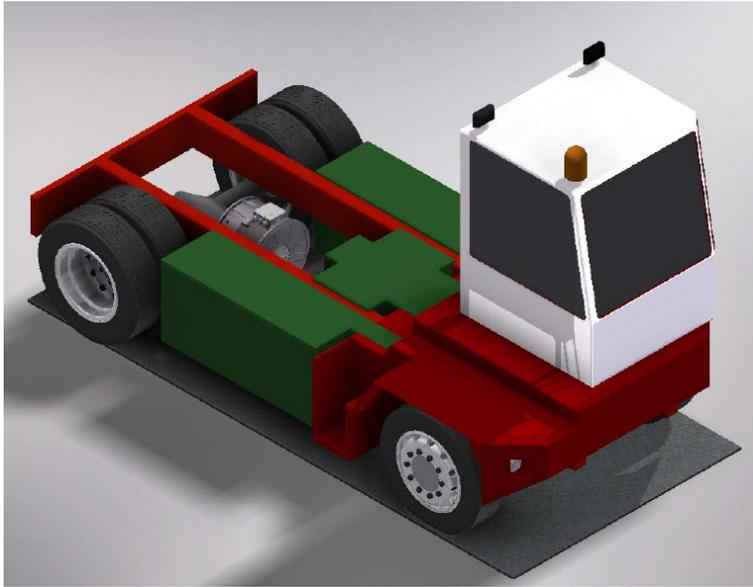


Abbildung 4: Aufteilung der Batterie-Container in der Sattelzugmaschine

In den äußeren Batterie-Containern befinden sich jeweils zwei Teilbatterien, im inneren Batterie-Container eine Teilbatterie.

Eine Teil-Batterie besteht aus sechs seriell verschalteten Batterie-Modulen und einem Kühlsystem (Kühlflüssigkeitsbehälter, Pumpe usw.).

1.6.3. Aufbau eines Batteriemoduls

Kühlung:

Die Kühlung der Zellen im Modul erfolgt mittels Flüssigkeit. Dazu sind auf jeder Ableiterseite des Moduls je eine Kühlplatte installiert. Über diese Kühlplatten und ein externes Kühlsystem erfolgt die thermische Konditionierung der Zellen. Eine Auslegung der Kühlung ist zum Zeitpunkt noch nicht erfolgt.

BMS:

Pro Modul erfolgen die Slave Funktionen wie Monitoring und Balancing über eine aufgesetzte Platine (Slave Modul).
Modulgehäuse:

Da das Modul luftdicht eingehaust ist, müssen Burst-Membrane für die Freisetzung von Gas im Fehlerfall vorgesehen werden. Dies gilt auch für den äußeren Container. Ein Ausgleichselement für normale Druckschwankungen ist ebenfalls vorzusehen.

2. Auslegung der Kühlung und Heizung der Batterie

Um die Kühlleistung nicht zu stark auf den Energieinhalt der Gesamtbatterie einwirken zu lassen, wird das Kühlaggregat auf eine Kühlleistung 150W pro Modul und in Summe auf 4,5 kW ausgelegt.

Das Kühlaggregat wird in den mittleren Batterietrog integriert. Ein Wechselrichter mit max. 3kW erzeugt die Versorgungsspannung für Kühlung und Heizung.

3. Konstruktion der Batterie-Container

Alle Container werden mit Abdeckungen aus Tränenblech, 3/5mm, ausgestattet. Damit sind die Batterie-Container begehbar.

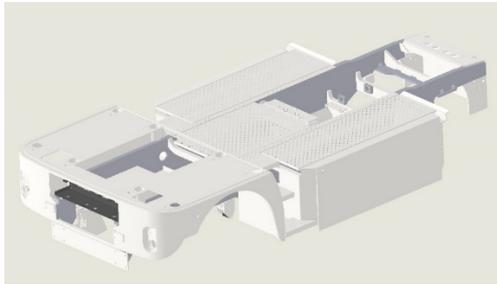


Abbildung 5: Position der Batterie-Container am Fahrzeugrahmen

Im Wesentlichen sind neben der mechanischen Aufnahme drei Schnittstellen zwischen der Batterie bzw. den Batterie-Container und dem Fahrzeug zu definieren. Dies betrifft den DC-Bus, die Steuerleitungen und der Wasseranschluss für den Kühlkreislauf.

Tabelle 2: Übersicht der Schnittstellen zwischen Fahrzeug und Batterie

Stecker	Verbindung
a) DC-Bus	Plus- und Minusleitung der Batterie mit 70 mm ² , Steckertyp MultiContact Buchsenseite
b) Steuerleitungen	CAN-Bus und Hardware Handshake, Leitungen sind im Mittelteil des Steckers geführt
c) Wasseranschluss	ist für Vor- und Rücklauf beidseitig mit selbst schließenden Kupplungen ausgeführt

4. Realisierung des Battery Management Systems (BMS)

Für das Monitoring der Zellen und für die Berechnung von SoC und SoH wurde folgendes BMS entwickelt und getestet:

- BMS-Master (BMU)
- BMS-Slave (BP)
- BMS-Stromerfassung (SE)
- BMS-Batterie Disconnect Unit (BDU)

5. Realisierung des Software Energie Management Systems

Nachdem für den BTT eine Batterie bestehend aus 5 Teilbatterien vorgesehen ist, benötigt die Batterie einen Multi-Master Controller, der das Zusammenspiel der Teilbatterien steuert. Dieser Multi-Master kann als separate Steuerelektronik oder als verteilte Intelligenz in den BMS Master-Steuerungen realisiert werden. Aus Kostengründen wird die Lösung mit der verteilten Intelligenz realisiert. Die Gesamtbatterie kann damit auch im Fall einer Störung in einer Teilbatterie die Leistungsanforderungen des Fahrzeugs erfüllen. Die Zuschaltung einer Batterie erfolgt kontrolliert bei angeglichenem Ladezustand.

6. Auswahl der Leistungselektronik für das Fahrzeug

Passend zu den technischen Anforderungen des Fahrzeugs für den Antriebsstrang und die Versorgung von Neben- und Hilfsaggregaten wurde die Leistungselektronik ausgewählt. Für den Fahrtrieb wurde eine Spitzenleistung von etwa 200kW zugrunde gelegt.

7. Entwicklung eines stationären Batterieladegeräts

Um die Leistungsfähigkeit der Batterie in den Einsatzzeiten der Häfen aufrecht zu erhalten, muss die Fahrzeugbatterie in einem akzeptablen Zeitraum nachgeladen werden. Das Nachladen mit einer Laderate im Bereich von 1 C entspricht ca. 1 Stunde Ladezeit. Mit einer Kapazität der Batterie von 167kWh und einer Entladetiefe von 80% müssen ca. 135kWh Energie nachgeladen werden. Das zu entwickelnde Ladegerät soll daher eine nominale Ladeleistung von 200 kW haben, um die Batterie unter einer Stunde laden zu können.

8. Aufbau der Komponenten

Die drei Batteriecontainer wurden gemäß der Konstruktionszeichnungen hergestellt und mit den Batteriemodulen verheiratet. Die Integration in das Fahrzeug erfolgte durch Konecranes. Die Leistungselektronik bestehend aus dem Fahrtriebswechselrichter und dem Wechselrichter für Bordnetz, Klima und Hydraulik wurden jeweils als Einzelkomponenten geliefert und von Konecranes in einem Schaltschrank am Fahrzeug verbaut. Das Ladegerät wurde zusammen mit einem Luft-Wasser-Wärmetauscher in einem Ladecontainer aufgestellt und angeschlossen.

Ein separates Bedienfeld außen am Container erlaubt das kontrollierte Zu- und Abschalten des Ladegerätes. Wenn die Batterien des Fahrzeugs geladen werden, sind nur die Batterien und das Ladegerät miteinander verbunden. Das Fahrzeug und die verbauten Leistungs- und Kontrollbaugruppen sind beim Laden abgetrennt. Eine PE-Ausgleichsleitung mit Verbindung zum PE des öffentlichen Netzes wird parallel zum DC Hochvolt- und Datenanschluss am Fahrzeug angeschlossen.

9. Inbetriebnahme

Der Fahrbetrieb des Fahrzeugs zeigt, dass es bei Bremsvorgängen nach abgeschlossenem Ladevorgang noch zu Batteriefehlern „Überspannung“ kommen kann. Das ist ein Zeichen dafür, dass die rekuperierte Energie von der Batterie in diesem Ladezustand nicht vollständig aufgenommen werden kann. Als Maßnahme muss die Spannungsobergrenze beim Symmetri laden abgesenkt werden.

10. Begleitung des Testbetriebs bei NTM

Die ersten Fahrversuche des Terminal Trucks in Düsseldorf zeigten grundsätzlich, dass der Fahrbetrieb des Trucks mit den Lithium-Batterien möglich ist und die in der Batterie-Software realisierten Funktionalitäten korrekt arbeiten. Allerdings wurde bereits in diesem Stadium deutlich, dass Maßnahmen notwendigerweise ergriffen werden müssen, um das Betriebsverhalten des Gesamtverbundes bestehend aus Terminal Truck, Batterie und Ladegerät für den Terminalbetrieb zu optimieren.

Im Zuge einer notwendigen Restauration des Kühlsystems wurde dessen Klemmanschluss seitens REFU neu konzipiert, so dass konstruktive Maßnahmen zusätzlichen Schutz bieten. Unter anderem wurde die DC-Klemme durch auf Isolatoren montierte Stromschienen ersetzt, auf denen die Zuleitungen mit Kabelverschraubungen befestigt wurden. Diese fixieren die Leitungsführungen und bieten eine höhere Zugentlastung. Durch ein zusätzliches Makrolon-Gehäuse sind sie außerdem voneinander und gegen Berührung geschützt.

Ab Mitte Juni 2015 konnten abschließende Tests und Probefahrten des Terminal Trucks mit komplettiertem Batteriesystem gut durchgeführt werden. Dadurch dass allerdings nacheinander zwei von drei Batterie-Container zurückgeliefert wurden, konnten die Batterien im Umkehrschluss nur sehr ungleichmäßig belastet werden. Daraus resultierte eine asymmetrische Entladung. Dementsprechend war zu diesem Zeitpunkt bereits festzustellen, dass die Batterien einen sehr unterschiedlichen Ladezustand aufwiesen, wobei logischerweise gerade Batterie-Container 1, der dauerhaft im Truck verblieben war, den niedrigsten Ladezustand aufwies.

Nach Beginn der Erprobungsphase des Trucks im Terminal in Neuss, wurden zudem temperaturbedingte Störungen im Betriebsverhalten festgestellt. Technische Prämissen müssen dabei allerdings in Zusammenhang mit den äußeren Rahmenbedingungen sowie den Einsatzszenarien des Betreibers gesehen werden. Durch die für Deutschland

vergleichsweise sehr hohen Außentemperaturen in diesem Sommer, erhitzen sich die Batterien durch den ungeschützten Standort des Terminal Trucks bereits im Stillstand auf einen für das Laden nicht mehr zulässigen Temperaturbereich von über 40°C.

Diese Umstände bedingten das Dilemma, dass Schutzmechanismen zur Vermeidung von Übertemperatur in den Batterien den Ladevorgang behinderten. Dabei waren angesichts des Ladezustands und der Spannungsasymmetrie kontrollierte Ladephasen – in Verbindung mit Balancing – zwingend erforderlich. Immerhin sind für die Bestimmung der tatsächlich nutzbaren Kapazität die unteren Spannungsgrenzen ausschlaggebend, da diese bei Belastung als erstes durch Erreichen der definierten Sicherheitsschwellen die Leistungsabgabe reduzieren bzw. komplett einschränken. Wiederum ist die Spannungsobergrenze dafür entscheidend, zu welchem Zeitpunkt der Ladevorgang unterbrochen werden muss, weil die Zellspannungen die Ladeschlussgrenze erreichen. Zusammengefasst bedeutet das, je größer das Delta zwischen der obersten und der untersten Spannung ist, desto größer sind die Einschränkungen in der Nutzbarkeit einer Batterie.

Erschwerend kam hinzu, dass es während eines unbeobachteten Ladevorgangs Anfang August zu einer Störung kam, so dass das Ladegerät mit angeschlossener Batterie in einem unzulässigen Betriebszustand verweilte. In diesem Zustand kam durch Selbstentladung über die Nebenverbraucher sowie Ausgleichströmen zwischen den Teilbatterien zu einer asymmetrischen Entladung, was für die Angleichung der Zellspannung kontraproduktiv war und die Differenz zwischen Spannungsob- und Spannungsuntergrenze auch innerhalb der Teilbatterien deutlich erhöhte.

Über eine entsprechend konsequente Handhabung des Ladevorgangs konnte diese Situation verbessert werden. Die Verbesserungen traten allerdings nur langsam ein, da die Balancing Ströme angesichts der Nennkapazität der Zellen mit 52 Ah und einem derart unausgeglichene Ladezustand verhältnismäßig gering sind. Die erzielten Fortschritte wurden Ende September jedoch zunichte gemacht, als erneut während des Ladevorgangs unbemerkt eine Störung aufgetreten ist. Dies führte teilweise zur Tiefenentladung einzelner Zellen und einem noch größeren Delta innerhalb der Zellspannungen der jeweiligen Teilbatterien. Die Funktionsfähigkeit der Batterie konnte im Nachgang wiederhergestellt und verifiziert werden. Dennoch müssen die entsprechenden Zellen angesichts einer Unterschreitung der theoretischen Abschaltspannung von 3,0V gemäß der technischen Spezifikation als vorbeschädigt betrachtet werden. Es ist davon auszugehen, dass diese vorzeitige Alterung ein unterschiedliches Lade- und Entladerverhalten der Zellen zueinander bedingt.

Abbildung 6: Entwicklung der Spannungsdifferenz je Teilbatterie beim Symmetri laden

Mit zunehmender Dauer des Ladevorgangs konnte die Differenz zwischen maximaler Zellspannung und minimaler Zellspannung immer weiter reduziert werden bis hin zu einem Zustand, bei dem die Spannungsdifferenz je Teilbatterie nur noch bei 10 bis 30mV lag. Parallel dazu, konnte das Spannungsniveau insgesamt immer weiter angehoben werden, so dass bei der letzten Betrachtung eine vollständig ausbalancierte und geladene Batterie das Ergebnis war.

Abgesehen davon wurden über das Jahr 2015 hinweg immer wieder sukzessive Verbesserungen umgesetzt, die aus dem Feedback der Erprobungs- und Testfahrten von Konecranes resultierten. Primär ging es dabei um die Optimierung des Betriebsverhaltens des Terminal Trucks im Gesamtsystem – einschließlich der Ladeeinrichtung.

Zusätzlich wurden noch einige weitere Verbesserungsmaßnahmen und neue Funktionalitäten zusammen mit Konecranes definiert, die im Zuge einer neuen Systemarchitektur der Batteriesoftware eingeführt werden sollten. Dieses Update wurde durch die Probleme des Ladezustands der Batterie verzögert und wurde daher für 2016 eingeplant.

Zum Ende des Jahres 2015 konnte durch die getroffenen Maßnahmen und das damit verbundene konsequente Laden und Balancing ein symmetrischer Ladezustand aller Batterien bzw. Teilbatterien erreicht werden. Die Differenz der Zellspannungen lag bei geladenem Ladezustand am 18.12.2015 nur zwischen 20 und 40mV je nach Teilbatterie. Nachdem der Terminal Truck allerdings zu Beginn des Jahres 2016 vom Terminal in Neuss für Modifikationen zu Konecranes MHPS nach Düsseldorf überführt wurde, wurden in diesem Schritt die drei Batterie-Container zu REFU nach Pfullingen geliefert. Anlass hierfür waren die bereits im Jahr zuvor angedachten und mit Konecranes abgestimmten Verbesserungen an der Batterie. Es ging unter anderem darum, ein umfangreiches Firmware-Update aufzuspielen und zu testen.

Da die Batterie von REFU nicht mehr im Testbetrieb zum Einsatz kommen sollte, wurden diese Arbeiten vorzeitig beendet, die Funktionalität der Firmware konnte jedoch bis dahin bereits verifiziert werden.

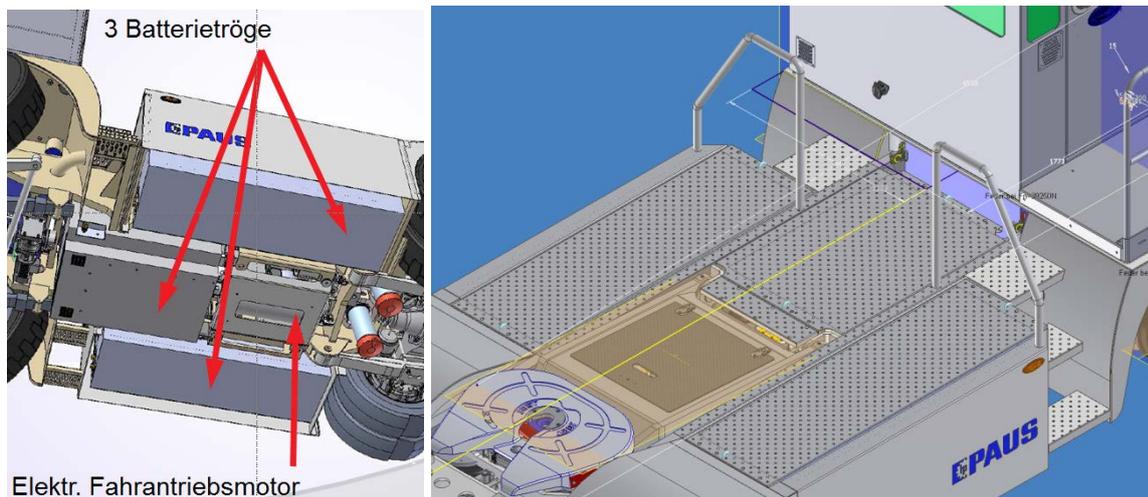
Zur Jahresmitte 2016 wurden darüber hinaus im Zuge der Inbetriebnahme der alternativen Batterie im Terminal Truck gewisse Anpassungen an der Parametrierung und der Kommunikation des Ladegeräts durchgeführt. Im Nachgang zu diesen Modifikationen ermöglichte das Ladegerät von REFU gleichermaßen auch das Laden der alternativen Batterie.

Tätigkeiten PAUS

Die Abstimmung der mechanischen und elektrischen Schnittstellen zwischen den Batterietrögen und dem Rest des Fahrzeugs gestaltete sich als besonders komplex und zeitintensiv. Der Grund liegt in den großen Anstrengungen, die beim Projektpartner Refu zur F&E der Batterietechnik im engeren Sinne erforderlich waren. Wegen Einzelheiten hierzu wird an dieser Stelle auf die entsprechenden Berichtsanteile des Projektpartners verwiesen. Ein Teilergebnis dieser Entwicklung besteht in der Schlussfolgerung, das gesamte Batterievolumen auf drei einzelne Batterietröge aufzuteilen, vgl. Bericht zum Arbeitspunkt 5c. Die erarbeitete Lösung trägt folgenden Aspekten Rechnung:

- Stoßfeste Aufhängung der Batterietröge im Fahrzeug
- Kollisionsgeschützte Unterbringung der Batterietröge im Fahrzeug
- Design / optische Gestaltung der Fahrzeug-Sichtflächen
- Erfüllung ergonomischer und arbeitssicherheitsrechtlicher Belange der angrenzenden Fahrzeugbereiche (Aufstiege und Laufflächen)
- Minimierung von Platzbedarf
- Freihalten von Leitungswegen für Leitungsverbindungen des vorderen und hinteren Fahrzeugteils
- Ermöglichung eines schnellen und unter Handhabungsgesichtspunkten einfachen Batterietrogwechsels
- Gute Zugänglichkeit der Leitungsverbindungen der Tröge (Energieleitungen, Steuerleitungen, Kühlleitungen)
- Wahl und Unterbringung funktional und sicherheitstechnisch auskömmlicher Steckverbinder
- Platzierung des Batterieladesteckers unter funktionalen, ergonomischen und sicherheitstechnischen Gesichtspunkten
- Sicherstellen der erforderlichen Kühlfunktion.

Das Entwicklungsergebnis ist zusammenfassend in den beiden nachfolgenden Bildern dargestellt. Sie zeigen jeweils eine perspektivische Unteransicht und Oberansicht der im Fahrzeug integrierten Batteriesysteme.



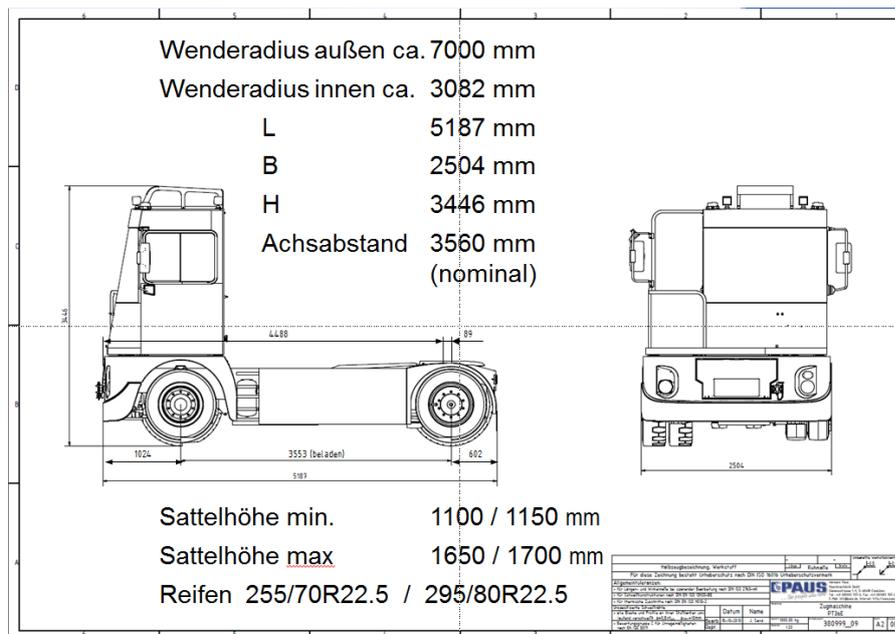
Als weiteres Arbeitsergebnis ist festzuhalten, dass eine wechselseitige Optimierung der thermischen Systeme Kabine und Batterie nicht in dem Sinne möglich ist, dass Wärme des einen dieser beiden Systeme zur thermischen Konditionierung des jeweils anderen genutzt werden kann. Die Situation hängt sehr stark von den Temperaturvorwahlen des Fahrers in der Kabine und der Temperaturanforderung der Batterie ab.

AP5c - Konstruktive Umsetzung

Das zuvor in den vorangegangenen Arbeitspunkten AP1 bis AP4 erarbeitete Fahrzeugkonzept wird systemtechnisch zum Beginn des Arbeitspunktes zusammenfassend beschrieben durch

- das Gesamtlayout gemäß Konzeptversion 5.3
- das Blockschaltbild, wie in Arbeitspunkt AP3a beschrieben.

Gemäß der Konzeptversion 5.3 waren in Abstimmung mit dem Projektpartner Refu zur Maximierung des Nutzvolumens der Batterie und somit zur Maximierung der Speicherkapazität auch „Nischen“ in den Randbereichen des Einbauraumes für die Batterien ausgenutzt worden. Im Verlauf der weiteren Entwicklungsarbeit wurde dann nach Erlangung neuer Kenntnisse erkannt, dass die Aufteilung auf drei einzelne Batterietröge insgesamt vorteilhaft ist. Ausschlaggebend sind der innere Aufbau der Batteriepakete und das Erreichen der erforderlichen mechanischen Festigkeit der Batteriepakete. Folglich wurde das Konzept im Rahmen von Detaillierung und Umsetzung im Arbeitspunkt 5c so weiterentwickelt, dass der rechte und linke Batterietrog an der Schnittstelle zu angrenzenden Fahrzeugteilen spiegelbildlich gleich aufgebaut werden. Für diesen Schritt sprachen auch die überwiegenden Vorteile hinsichtlich Erleichterung des Batteriewechsels aufgrund kleinerer Maße, niedrigerer Gewichte, und einer einfacher zu handhabenden und somit auch sichereren Positionierung im Fahrzeug, Schaffung von Freiräumen der Leitungsverlegung zwischen vorderem und hinterem Fahrzeugteil, belastungsmäßig günstigerer Gestaltung der Längsträger des Fahrzeugrahmens. Das Resultat ist bereits unter AP5b bildlich dargestellt. Die Weiterentwicklung der Konzeptversion 5.3 ist zeichnerisch in der nachfolgend abgebildeten Paus-Zeichnung 380999_09Rev00 darstellt.

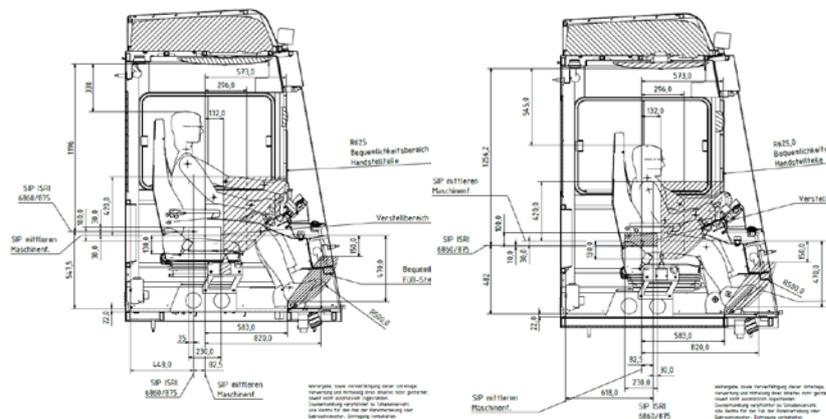
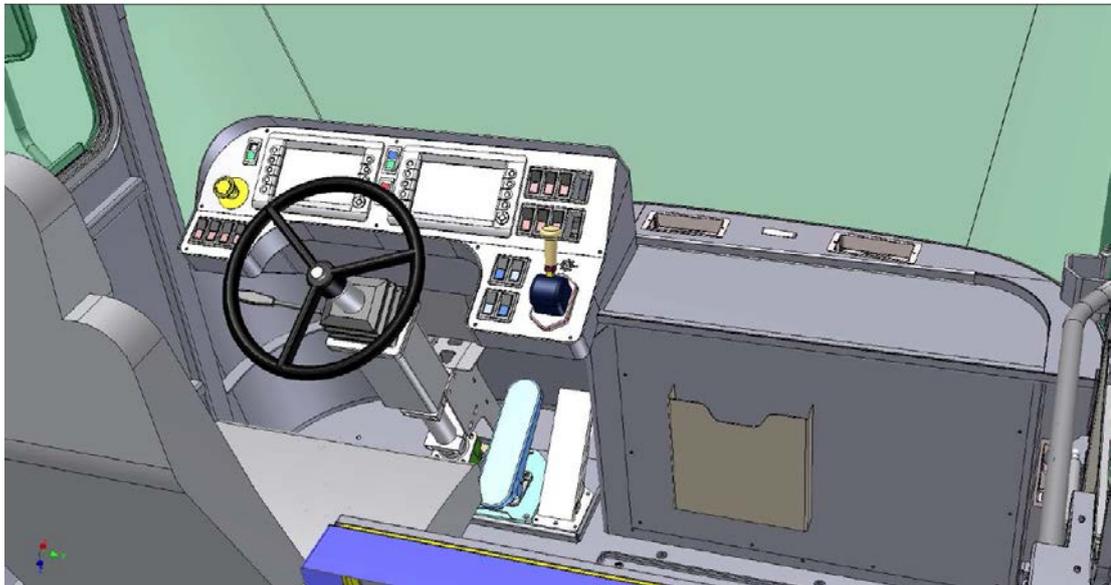


Weiterhin wurden die erforderlichen Abstimmungen mit TÜV und Berufsgenossenschaft durchgeführt. Um die nötigen entwicklungstechnischen Voraussetzungen für die Gewährleistung der elektro-magnetischen Verträglichkeit zu schaffen, wurden Vorkehrungen insbesondere in Gestalt der Abschirmung von Leitungen und deren nach gegenwärtigem Kenntnisstand optimalen Verlegung im Fahrzeug geschaffen. Entscheidungen über Installationswege im Fahrzeug und die Platzierung von Komponenten wurden daher unter anderem nach diesen Gesichtspunkten getroffen.

Der Personenschutz in der Fahrerkabine erfordert einen Sicherheitsnachweis für den Fall des Herabfallens von Gegenständen und das Umkippen des Trucks. Anhand eines Real-Mock-Up (Testkabine) wurden unter Nutzung von Versuchseinrichtungen und Personal des akkreditierten Testzentrums der DLG, Groß-Umstadt, experimentelle Untersuchungen zur Festigkeit der Kabinenstruktur für die Szenarien eines Fahrzeugumsturzes (ROPS) und eines auf die Kabine herabfallenden Container-Eckbeschlages (FOPS) vorgenommen. Während im FOPS-Test erwartungsgemäß sogleich die Übereinstimmung mit den Anforderungen nach EN ISO 3449 bezüglich herabfallender Gegenstände demonstriert werden konnte, konnten aus dem ROPS-Test zur Simulation des Umsturzes die nötigen Erkenntnisse für die erforderlichen Reduzierungen der Verformungen gezogen werden. Bereits die erste Wiederholung der des ROPS-Tests führte dann schon zur Erfüllung der Anforderungen nach EN ISO 3471.



Die innere Gestaltung der Fahrerkabine erfolgte nach ergonomischen und arbeitsplatzbezogenen Anforderungen, als Grundlage diente auch die Truckspezifikation von CTA. Entsprechend wurde die Armaturentafel übersichtlich und bedienerfreundlich gestaltet.



Die Ergebnisse der Fahrzeugentwicklung wurden branchenüblich in Zeichnungen, Schaltplänen und Stücklisten dokumentiert. Parallel zur Fahrzeugentwicklung und -konstruktion wurde die gesetzlich geforderte Dokumentation zur Konformitätsbewertung erstellt.



Neben der konstruktiven Ausführung des Trucks wurden verschiedene Designentwürfe für die Lackierung und die Beschriftung des BTT-Prototyps erarbeitet. Im Rahmen des Konsortialtreffens vom 14.10.2014 wurden verschiedene Designvorschläge durch Paus und Konecranes vorgestellt und das Oben abgebildete Design von allen Seiten angenommen.

Konstruktive Änderung eines Trailers für die Aufnahme einer Blei-Säure-Batterie

Aus dem Bereich der Flurförderzeuge sind die 80V Blei-Säure-Batterien bekannt. Diese werden von TPS erfolgreich in den automatisierten AGVs (Automated Guided Vehicle) erprobt und in aktuell im Aufbau befindlichen großen Seehafenterminals eingesetzt. Hierfür waren vor allem wirtschaftliche Aspekte ausschlaggebend.

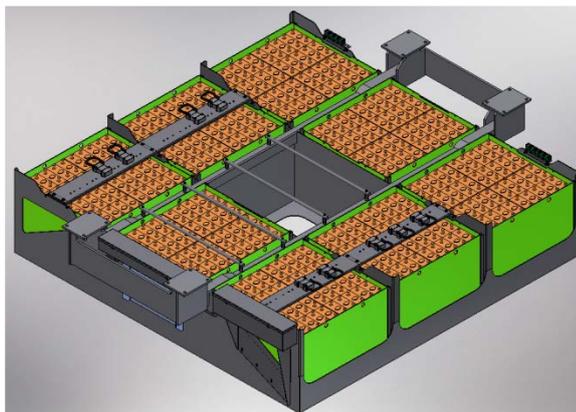
Blei-Säure-Batterien weisen eine hohe Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit auf. Nachteilig bei diesen Batterien sind die niedrige Energiedichte, was zu einem hohen Gewicht der Batterie führt, und die lange Ladezeit. Für einen durchgehenden Betrieb werden daher zumeist Batteriewechselkonzepte verfolgt, so dass die Ladezeiten der Batterien nicht zu Lasten der Einsatzzeit der Fahrzeuge gehen.

Aufgrund des großen Bauraums und des hohen Gewichts der Blei-Säure-Batterie kann diese nicht im Terminal-Truck selbst integriert werden. Es wurde kein neuer Trailer konstruiert, es wurde ein Trailer bei einem bekannten und anerkannten Trailer Lieferanten ausgewählt. Eine geeignete Batterieaufnahme musste konstruktiv in den Trailer eingepasst werden. Dabei wird akzeptiert, dass sich die zulässige Zuladung des Trailers von 60t auf 50t reduziert um das Batteriegewicht auszugleichen (das Terminal in Neuss (NTM) erwartete nicht mit dem Trailer mehr als 50t transportieren zu müssen).

Blei-Säure-Batterie und deren prinzipielle Installation im Trailer sind von dem im AGV eingesetzten Batteriesystem abgeleitet. Die unterschiedliche Spannungslage im Terminal Truck machte eine Reduktion der Anzahl Einzeltröge von 9 auf 8 erforderlich. Der Truck selbst, mit der installierten Li-Ion-Technologie, ist auf eine Nennspannung von 630-640V ausgelegt. Die im Trailer eingesetzte Blei-Säure-Batterie mit ihren 8 Einzeltrögen ist somit zu der installierten Umrichter-/Antriebstechnik kompatibel und kann für den Versuchsbetrieb wahlweise, durch umstecken der versorgenden Batterieeinheit, zugeschaltet werden.

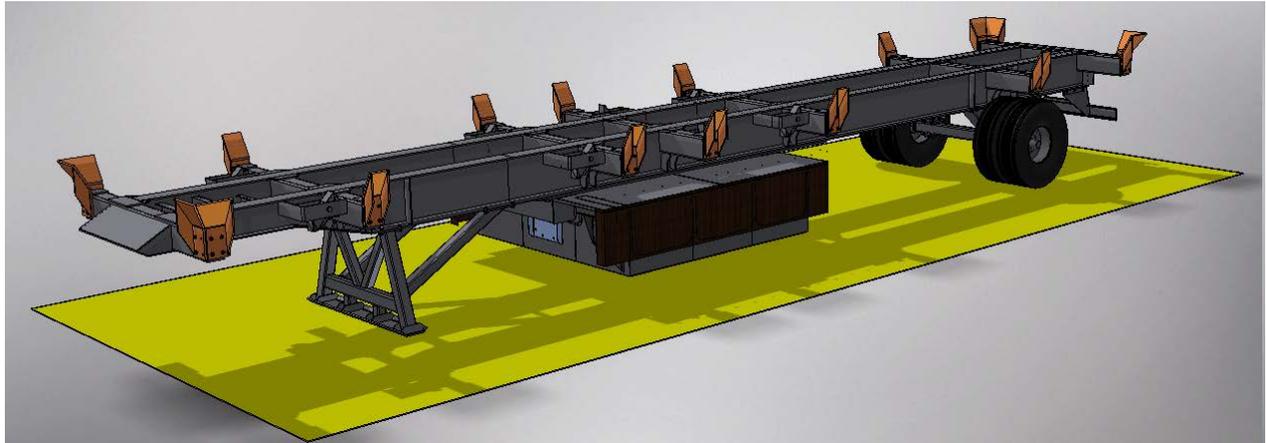
In der eingesetzten Konfiguration verfügt der Bleitrog über rund 240kWh nutzbare Energie, dies sind ca. 60% mehr als in der Li-Ion-Batterie im Truck selbst enthalten sein werden. Im realen Terminaleinsatz mit einem fest mit dem Truck gekuppelten Batteriechassis wird es somit sicherer möglich sein den üblichen Schichtbetrieb zu bewältigen. Ob die höhere Energie erforderlich ist wird sich in den beiden Terminals des Feldversuchs zeigen. Das Bleibatteriechassis wird zwar nur in Neuss bei NTM eingesetzt und erprobt werden. Die Kombination aus realen Einsatzfahrten und speziellen, noch zu überlegenden, Messfahrten wird jedoch hinreichende Ergebnisse liefern um Rückschlüsse auf den späteren Serieneinsatz ziehen zu können.

In der folgenden Abbildung ist der Vorentwurf des Batterietroges dargestellt. Es ist vorgesehen die Halterungen an den Trailer anzuschrauben. Der Batterietrog selbst wird in diese Halterungen entnehmbar eingehängt, jedoch war kein Batteriewechsel während des Erprobungszeitraums vorgesehen. Der Betrieb bei NTM erlaubt immer die Nachladung über Nacht.



Die elektrische Verbindung zwischen Trailer und Trog ist steckbar ausgeführt, sodass über die Ladestecker wahlweise die Verbindung zum Truck gewählt werden kann. Eine installierte SPS im Trailer sorgt in Verbindung mit Schützen und der Kommunikation mit der Haupt SPS im Truck für eine sichere Abschaltung der Trailerbatterie sobald deren Steckverbindung zum Truck entfernt wurde. Somit ist sichergestellt, dass außerhalb der Einzeltröge keine Spannung am Trailer anliegt wenn dessen Energie nicht benötigt wird.

Die geometrische Positionierung des Batterietroges im Trailer wurde statisch neutral ausgeführt um weder Sattelplatte noch Trailerachse über der erlaubten Zuladung zu belasten. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Trailer mit installierter Blei-Säure-Batterie.



Konstruktive Ausgestaltung Ladeinfrastruktur

Sowohl für das Bleibatteriesystem als auch für das Lithium-Ionen-Batteriesystem wurde eine eigene Ladeinfrastruktur vorgesehen. Bei dem Bleibatteriesystem handelt es sich um acht Standard-Gabelstaplerbatterien, die im Fahrzeug in Reihe geschaltet werden. Für den Ladevorgang kann diese Reihenschaltung im Batteriesystem aufgetrennt werden (siehe Abbildung) und die Batterien können entsprechend mit Standardladegeräten geladen werden. Dafür sind lediglich der Anschluss von Pilotkontakten sowie die elektrische Verbindung über das Ladegerät notwendig. Der Ladevorgang wird über das Ladegerät gesteuert. Zusätzlich werden für diesen Versuchsträger auch einfache Batteriecontroller für die Bleibatterie angeschafft und per CAN mit der Fahrzeugsteuerung verbunden. Sie sind für den Ladevorgang jedoch nicht relevant.

Das Lithiumbatteriesystem ist eine maßgeschneiderte Lösung. Es besteht aus drei Trögen. Im Gegensatz zu Bleibatterien wird bei Lithiumbatterien der Ladevorgang von dem Batteriemanagementsystem (BMS) bzw. dem BMS-Master gesteuert. Deshalb ist im Fahrzeug eine elektrische Schnittstelle für den Ladevorgang implementiert worden. Neben einem Hochspannungsanschluss und Pilotkontakten beinhaltet diese auch ein CAN-Bus-Interface, mit dessen Hilfe der BMS-Master mit dem Ladegerät kommunizieren kann. Das Ladegerät wird im Gegensatz zu der Bleibatterie-Lösung nicht direkt mit den Batterietrögen verbunden, sondern mit einer fahrzeugseitig vorhandenen Schnittstelle. Die Steckverbindung zwischen Ladegerät und Fahrzeug konnte kompatibel zu der Steckverbindung zwischen Trögen und Fahrzeug gestaltet werden.

In der Abbildung nicht zu sehen ist die Fahrzeug-SPS, die die Signale der verschiedenen Pilotkontakte ebenfalls auswertet und entsprechende Freigaben erteilt. Dies ist jedoch lediglich für das Laden des Lithiumbatteriesystems relevant.

Die beiden beschriebenen Ladesysteme werden bei sowohl in Düsseldorf als auch in den Häfen in Neuss und Hamburg benötigt, müssen also transportiert werden und wetterfest untergebracht werden. Aus diesem Grund wurden beide Systeme in einem 20'-Container integriert.

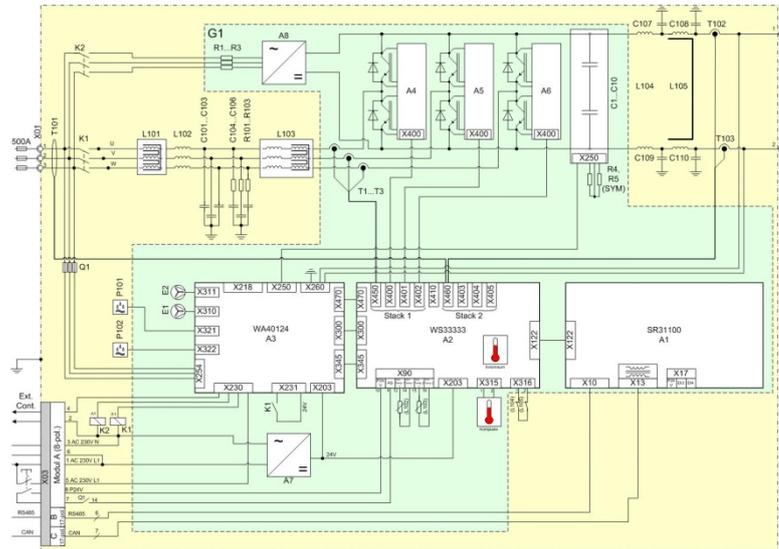
Es sind die acht Standard-Bleibatterie-Ladegeräte eingebaut sowie das Lithiumbatterie-Ladegerät. Aufgrund der kompakten Bauweise des Lithiumbatterie-Ladegerätes (eine für diese Anwendung angepasste Lösung) und der hohen Ladeströme ist die Integration einer Wasserkühlung mit externem Wärmetauscher notwendig. Weiterhin wird eine Unterverteilung und zusätzliche Containertechnik benötigt (Beleuchtung, Rauchmelder & Sirene, Lüfter). Die Ladekabel wurden nach außen geführt und an Halterungen aufgehängt, die unter einem Wetterschutz montiert sind.

Eine besondere Anforderung an die Ladeinfrastruktur stellen die an den verschiedenen Standorten zur Verfügung stehenden elektrischen Netzanschlüsse dar: Es konnten nicht mehr als 250A (400V) bzw. 125A (400V) bereitgestellt

werden. Dies bedeutet, dass sichergestellt werden musste, dass Blei- und Lithiumbatteriesysteme nicht gleichzeitig geladen werden können. Weiterhin muss bei beiden Ladesystemen die Möglichkeit bestehen, den Strom zu begrenzen.

Ladegerät Li-Ion

Um die Leistungsfähigkeit der Batterie in den Einsatzzeiten der Häfen aufrecht zu erhalten, muss die Fahrzeugbatterie in einem akzeptablen Zeitraum nachgeladen werden. Eine Ladung im Bereich 1 mal C entspricht ca. 1 Stunde Ladezeit. Mit einer Kapazität der Batterie von 167kWh und einer Entladetiefe von 80% müssen ca. 135kWh Energie nachgeladen werden. Das zu entwickelnde Ladegerät soll daher eine nominale Ladeleistung von 200 kW haben, um unter 1 Stunde zu laden.



Ströme

Für das Laden der Batterie mit einer Leistung von ca. 200kW muss in den Häfen darauf geachtet werden, dass die Zuleitung zum Ladecontainer nicht durch andere/weitere Verbraucher belastet wird bzw. entsprechende Reserven bieten.

Kühlung

Als Kühlung des Ladegerätes dient eine Wasserkühlung vorgesehen. Die Rückkühlung erfolgt mit einem Luft/Wasser-Kühler der neben dem Ladegerät angeordnet ist.

AP 6 - Aufbau

Die fertigungsplanerischen Arbeiten sind für den Anteil des Projektpartners Paus auf Basis der zuvor im Arbeitspunkt 5c erstellten Konstruktionsunterlagen durchgeführt worden.

Der AP 6 beschäftigt sich mit dem Aufbau der Zugmaschine des BTT, wobei es zu einer engen Zusammenarbeit der beteiligten Projektpartner Konecranes, Paus und REFU kam. Paus hat die Fertigung und Montage des Fahrzeugs mit Ausnahme des elektrischen Leistungsteils und der übergeordneten Fahrzeug- und Batterieladesteuerung übernommen und an Konecranes geliefert. Der vormontierte Truck wurde bei Konecranes mit den Leistungselektronikkomponenten und Batterien von REFU, später im Rahmen der Projekterweiterung mit alternativen Batterien, ausgestattet.

Aufgrund verschiedener technischer Abstimmungen zwischen den konstruierenden Projektpartnern konnte der Konstruktionsstand des BTT bei Paus erst gegen Ende 2013 eingefroren und die Fertigung begonnen werden. In erster Linie hat sich die konstruktive Festlegung und Lieferung der Umrichterkomponenten und Batterietröge von REFU verzögert, sodass der Einbau der Umrichter in den Leistungsschaltschrank (L-Schrank) bei Konecranes erst verspätet beginnen konnte. Mit dem ersten Funktionstest konnte auf Grund des Liefertermins der Refu-Batterien an Konecranes dann erst im September 2014 begonnen werden.

Durchgeführte Arbeiten im Rahmen des AP6

- Konecranes
 - Einbau des batterie-elektrischen Antriebsstrangs in das Terminal Truck Chassis
Der von Konecranes ausgewählte und beigestellte Elektromotor wurde bei der Firma Paus in das Chassis des BTT eingebaut. Die Kopplung an die Antriebsachse erfolgt mittels Kardanwelle.
 - Bestückung und Verdrahtung des Leistungsschranks in der Kabine,
 - Verdrahtung des Leistungsschranks mit Fahrzeug (Motoranschluss etc.) und Batterien,
 - Bestückung und Verdrahtung der Kabinenplatine inklusive der Schnittstelle zur Fahrzeugelektrik der Firma Paus,
 - Umbau eines Trailers für die Aufnahme einer Blei-Säure-Batterie
Der von Konecranes zugekaufte Standardtrailer wurde in der Fertigung bei Konecranes für die Aufnahme des Bleibatterietroges vorbereitet. Die Hauptträger des Trailers wurden im Bereich der Trogaufnahme verstärkt und auf dem Bohrwerk für die Anbindung des Troges vorbereitet.
 - Aufbau Wechselrahmen für Blei-Säure-Batterie
Die 8 Einzelbleitröge wurde in einem von Konecranes gefertigten Wechselrahmen montiert und verkabelt.
 - Ladecontainer
Der Ladecontainer mit der wahlweisen Lademöglichkeit für Li-Ion- oder Blei-Technologie ist fertiggestellt und in Betrieb genommen.
 - Bestückung und Verdrahtung des vorhandenen Ladecontainers und Einbau des von REFU beigestellten Li-Ion-Ladegerätes,
 - Fertigstellung SPS-Software, ständig laufende Optimierung,
 - Fertigstellung Software Displays, ständig laufende Optimierung,
 - Parametrierung Umrichter (Fahrerumrichter; Hydraulikumrichter; Bordnetzer)
 - Optimierung der Kommunikationsschnittstelle (CAN-Bus) insbesondere zu den Li-Ion Batterien,
 - Erstellung eines Fehlermeldesystems, ständig laufende Erweiterung.



- Laufende Testfahrten zur Optimierung des Fahrverhaltens und der Rekuperation. Testfahrten zur Untersuchung der pneumatischen Bremse zusammen mit Paus und Knorr-Bremse auf dem Testgelände von Konecranes wurden nach vorherigem Einbau und Inbetriebnahme des batterieelektrischen Antriebsstranges erfolgreich abgeschlossen (Bild).



- Test des elektrischen Antriebsstrangs und der Batterie im Zusammenspiel und gegen die Leistungsspezifikation
- Paus
 - Herstellung und Montage von Chassis mit Sattelplatte und Hubeinrichtung, Fahrwerk, kompletter Kabine mit vollständiger Inneneinrichtung und Schalttafeln, Installation der Fahrzeugelektrik, Fahrzeughydraulik und Pneumatik einschließlich der hydro-pneumatischen Bremsanlage, Steuerung der Arbeitsfunktionen von Sattelplatte und Hubeinrichtung, die Schnittstellen zu den Aufbauanteilen der Projektpartner (insbesondere die Batterietröge mit dem Batteriemanagementsystem, die Umrichteranlage und die übergeordnete Fahrzeugsteuerung). Bereits einige, im Fall der Umrichteranlage bereits durch Konecranes vormontierte, Subsysteme aus den Anteilen der Partner wurden im Werk der Fa. Paus ebenfalls während des Aufbaus integriert (Fahrtriebmotor, Umrichteranlage, Kühlsystem für den Fahrtriebmotor und die Umrichteranlage, Testein- und -ausbau der im inneren Aufbau noch unfertigen äußeren Batterietröge zur Validierung der Schnittstellen).
 - Funktionen und Systeme des Projektanteils der Fa. Paus wurden, soweit im teilfertigen Zustand des Truck möglich, bereits im Werk der Fa. Paus in Betrieb genommen und getestet. Dafür wurde die zu dem Zeitpunkt planmäßig noch fehlende On-board Energieversorgung durch eine externe Energieversorgung ersetzt. Somit konnten folgende Systeme einer Vorinbetriebnahme unterzogen werden:

- Nebenantriebskreise für Hydraulik und Pneumatik
 - Lenkanlage
 - Bremsanlage
 - allgemeine Fahrzeugelektroanlage
 - Beleuchtungsanlage
 - Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage
 - pneumatische Fahrzeug- und Sitzfederung
 - Sattelplatte und Hubeinrichtung
 - Darüber hinaus wurden durch Fa. Paus entsprechend dem Aufbaufortschritt im Werk der Fa. Konecranes die Inbetriebnahmen und Tests erfolgreich fortgeführt.
 - Insgesamt wurden die Planungsergebnisse der vorangegangenen Arbeitspunkte ohne Einschränkungen und nennenswerte Änderungen im vollen Umfang im Arbeitspunkt „Aufbau“ umgesetzt. Im für den Prototypenbau typischen Umfang vorgenommene Optimierungen wurden in die Planungsunterlagen dokumentarisch eingearbeitet.
- REFU
 - Die Batteriecontainer „Links“, „Mitte“, „Rechts“ wurden gemäß den Konstruktionszeichnungen und Testmustern gebaut und in das Fahrzeug integriert.
 - Die Leistungselektronik Komponenten Fahrtriebswechselrichter und Wechselrichter für Bordnetz, Klima und Hydraulik wurden von Konecranes in einen Schaltschrank ins Fahrzeug integriert.
 - Das Ladegerät wurde zusammen mit einem Flüssigkeit/Luft Rückkühler in einen Ladecontainer verbaut und angeschlossen. Ein Bedienfeld am Container außen erlaubt das kontrollierte Zu- und Abschalten des Ladegerätes.
 - Wenn die Batterien des Fahrzeugs geladen werden, sind nur die Batterien und das Ladegerät miteinander verbunden. Das Fahrzeug und die verbauten Leistungs- und Kontrollbaugruppen sind beim Laden abgetrennt.
 - Eine entsprechend der hohen Stromstärke dimensionierte PE-Ausgleichsleitung mit Verbindung zum PE (Schutzleiter) des öffentlichen Netzes wird parallel zum DC Hochvolt- und Datenanschluss ans Fahrzeug angeschlossen.
 - NTM/CTA
 - Beratende Tätigkeit aus Kundensicht
 - Alle am Engineering beteiligten Projektpartner:
Erstellung einer begleitenden Konformitätsbewertung incl. jeweils zweckmäßiger Einbeziehung der Schnittstellen

AP 7: Versuchsprogramm und Inbetriebnahme

AP 7 umfasst die Inbetriebnahme des BTT und die Durchführung eines Versuchsprogramms.

In diesem Zusammenhang wurden die Einzelfunktionen des BTT schrittweise überprüft sowie nach Bedarf angepasst und optimiert. Es folgte die Inbetriebnahme auf dem Testfeld von Konecranes. Hier wurden durch Konecranes auch Messfahrten in einem Versuchsprogramm durchgeführt.

Darüber hinaus wurden bei den Projektpartnern CTA und NTM vorbereitende Arbeiten für den Feldtest durchgeführt. Der BTT benötigt eine Ladeinfrastruktur, für den Aufbau der Ladecontainer mussten Kabeltrassen erstellt werden, wozu Erdbauarbeiten durchgeführt worden sind (siehe Anhang, CTA).

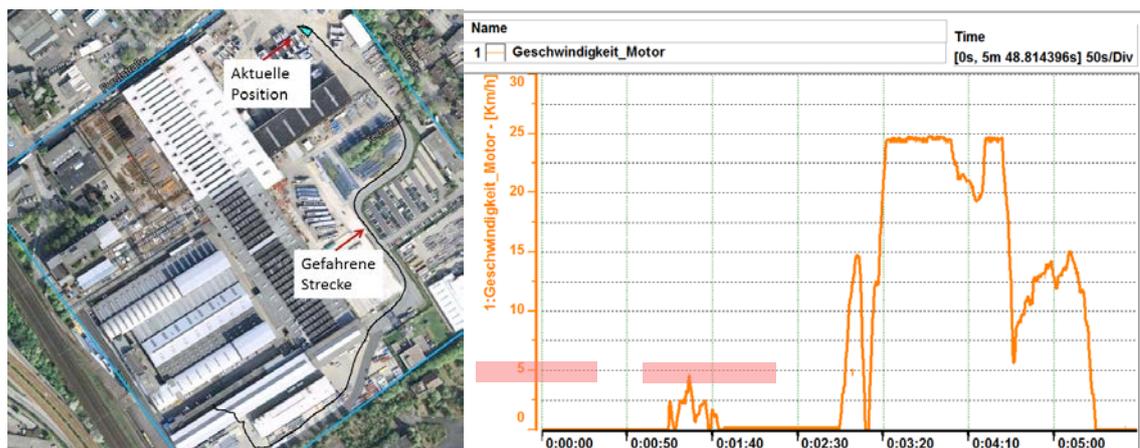
Im Folgenden wird das von Konecranes durchgeführte Versuchsprogramm erläutert:

Aufnahme und Auswertung von Messdaten

In Zusammenhang mit der Inbetriebnahme des Fahrzeuges werden erste Messdaten aufgenommen und ausgewertet. Diese Messdaten erlauben eine reale Abschätzung der Einsatzdauer und Erfassung von Leistungsdaten des Fahrzeuges. Die aufgenommenen Daten werden mit den vorher theoretisch errechneten Daten abgeglichen, um so eine genauere Abschätzung der Einsatzzeit des BTT vornehmen zu können.

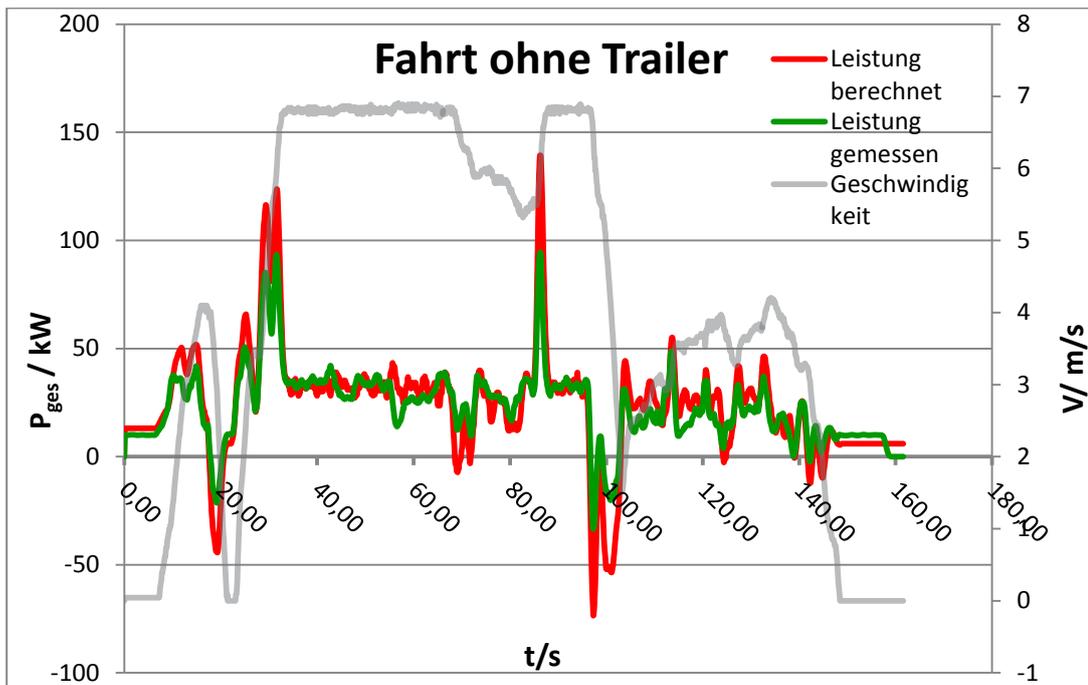
Messfahrt 1: Fahrt ohne Trailer

Die erste Messfahrt wurde ohne Trailer und Zusatzgewicht aufgenommen. Der BTT fuhr eine Strecke von 700 Meter. Im ersten Teil der Messung entstanden zwei Stillstandszeiten zum Öffnen und Schließen des Hallentors, markierte Bereiche.



Auch bei Stillstand des Fahrzeuges (erster und dritter Abschnitt) steigt die Energieverbrauchskurve an. Dies ist auf den Energieverbrauch der Nebenverbraucher zurückzuführen. Beim Abbremsen des Fahrzeuges wird die Leistung kurzzeitig negativ und die Energieverbrauchskurve sinkt. In diesem Fall wird Energie in die Batterien zurückgespeist.

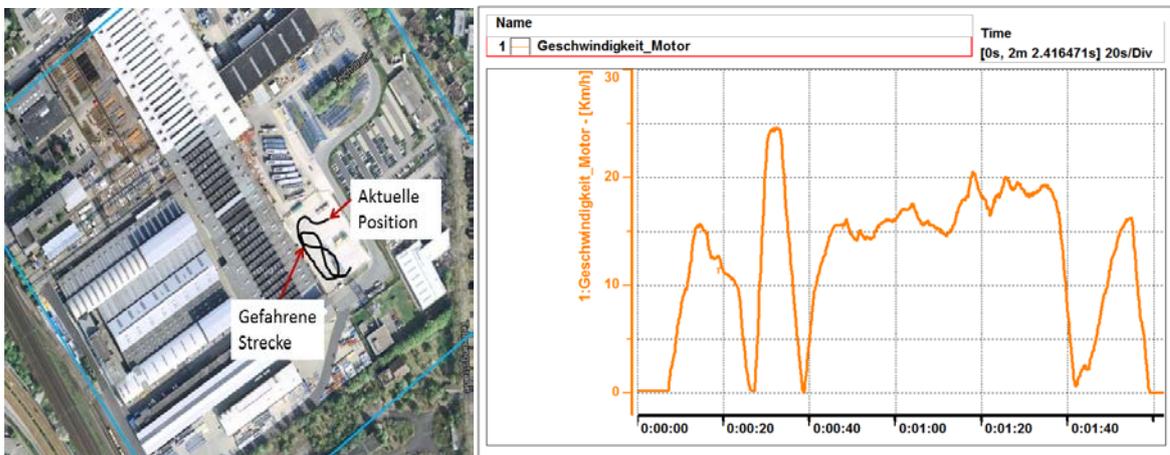
Das gemessene Fahrprofil wird nun in die, in der theoretischen Vorbetrachtung erstellte, Simulation eingelesen und die theoretisch berechnete Leistung sowie die reale gemessene Leistung in einem Diagramm dargestellt. Zusätzlich wird das Geschwindigkeitsprofil im Hintergrund abgebildet. Die Abbildung zeigt den Vergleich beider Leistungen beispielhaft für den vierten Abschnitt der Messung.



Es ist zu erkennen, dass der theoretisch berechnete Wert sich nur geringfügig von dem gemessenen Wert unterscheidet.

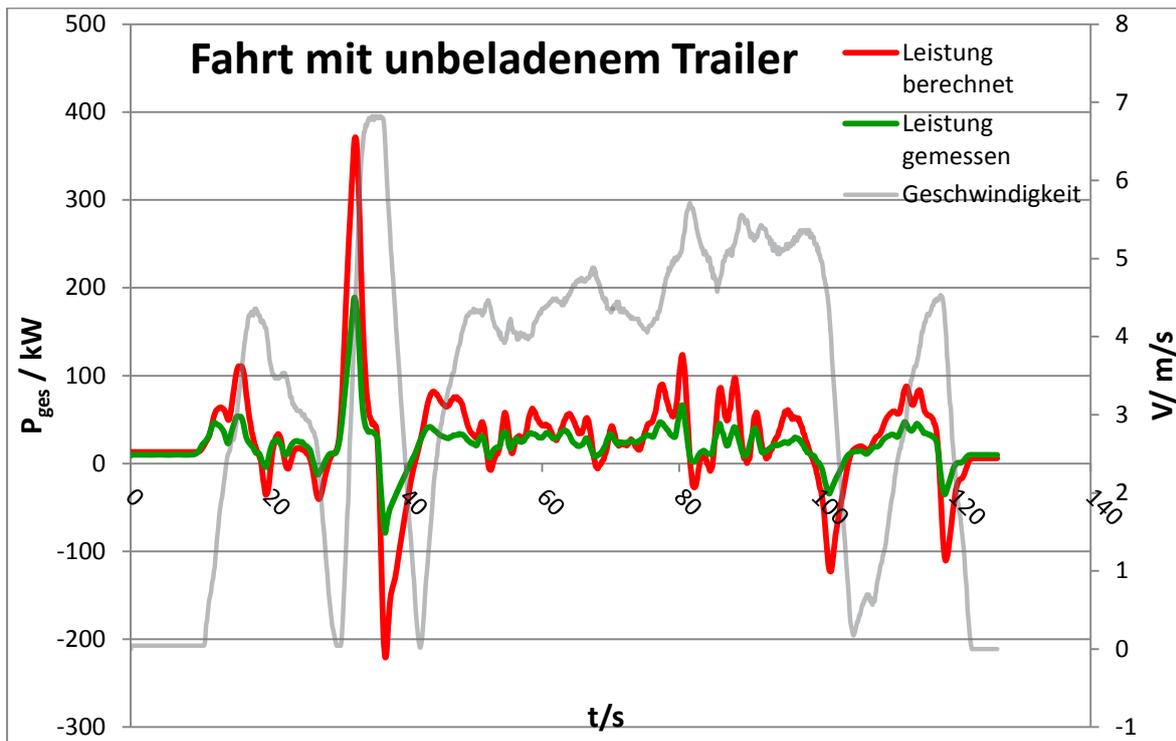
Messfahrt 2 mit unbeladenem Trailer

Der Trailer wird an den BTT angekuppelt und danach auf dem Testgelände gefahren. Die Strecke ist 400 Meter lang.



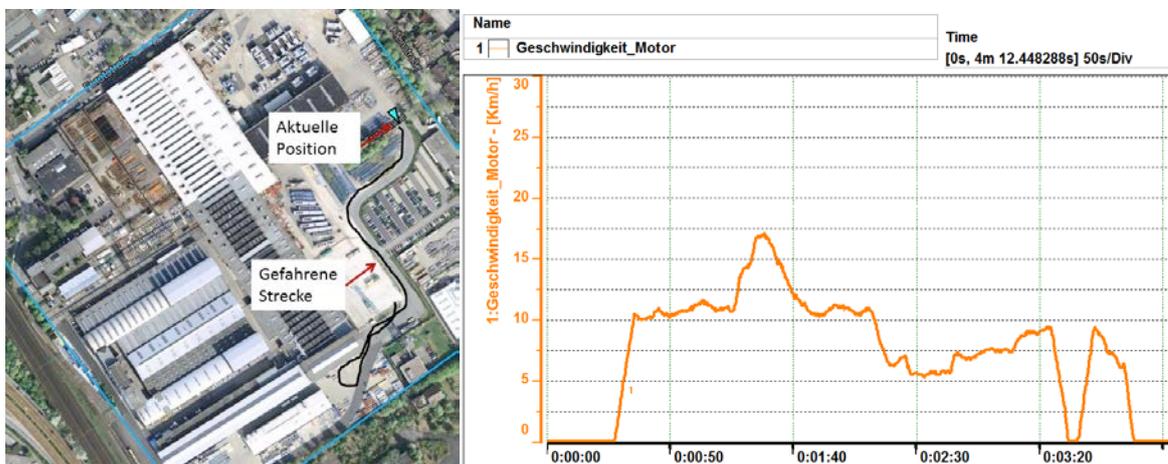
Aus der Abbildung geht hervor, dass der Energieverbrauch sowie der Strom des Fahrmotors mit ungeladenem Trailer durch die erhöhte Masse ansteigen.

Der Strom des Fahrmotors steigt bei maximaler Beschleunigung kurzzeitig bis ca. 400 A an. Dieser Wert wird über einen Zeitraum von 2 Sekunden jedoch nicht überschritten. Danach fällt der Strom wieder ab, da der Beschleunigungsvorgang beendet ist.

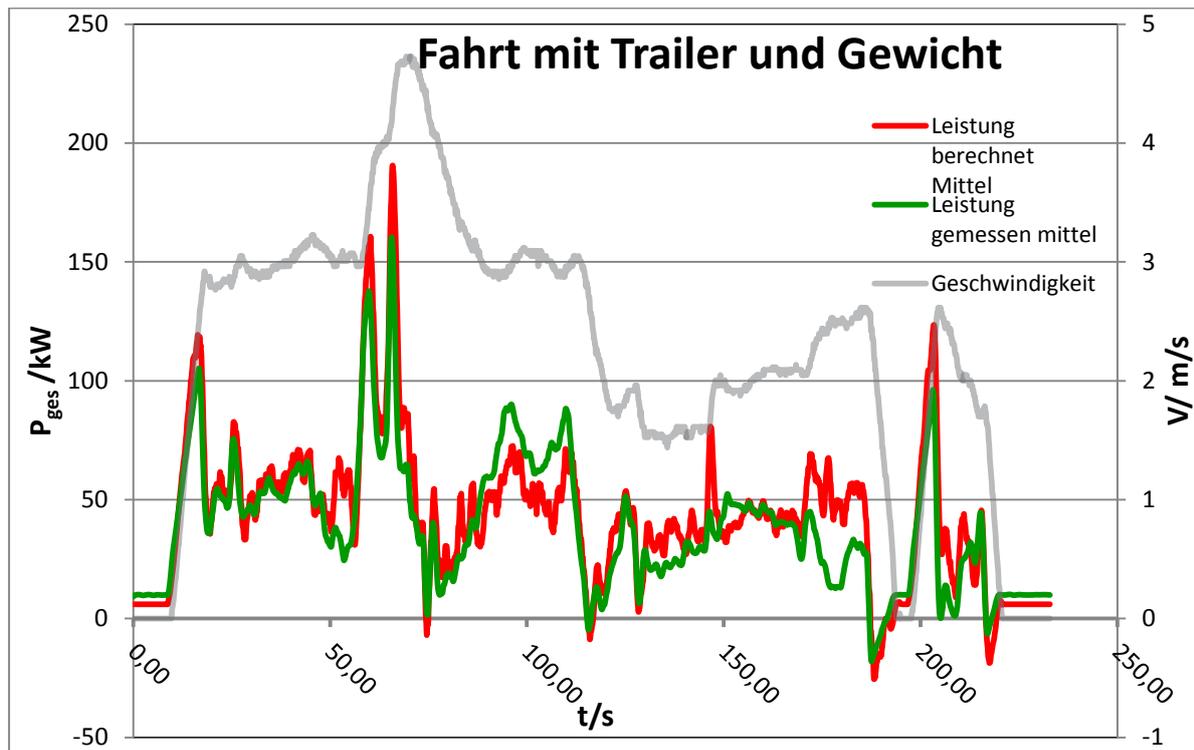


Messfahrt 3 mit Trailer und 34 t Zusatzgewicht

Nach Aufladen von 34 Tonnen Zusatzgewicht fährt der BTT eine Strecke von 600 Meter auf dem Gelände. Aufgrund der hohen Beladung ist dabei aus Sicherheitsgründen die Höchstgeschwindigkeit herabgesetzt.



Die Abbildung zeigt die Messwerte der dritten Messfahrt mit einer Zuladung von 34 Tonnen. Durch die Begrenzung des Stromes flacht die Leistungskurve ab und das Fahrzeug beschleunigt deutlich langsamer als bei den vorherigen Messungen.



Vergleich der Messfahrten

Im Vergleich der hier beispielhaft gezeigten 3 Messfahrten zeigt sich, dass die simulierten (rot) und die gemessenen (grün) Werte eine gute Übereinstimmung aufweisen. Der real gemessene Energieverbrauch ist etwas günstiger als der Vorberechnete. Wie sich dies im Terminalbetrieb auswirkt werden die zukünftigen Messungen in den Feldtests zeigen.

Ausgeführte Tätigkeiten im Rahmen des AP7 in zeitlicher Reihenfolge

- Bremsvalidierung (Paus, in Zusammenarbeit mit Firma Knorr-Bremse, Januar 2015)

Die vor Lieferung des teilfertigen Trucks nicht möglichen statischen und dynamischen Gesamtfahrzeug- und Systemtests in unterschiedlichen Lastzuständen wurden im Zuge der Inbetriebnahme durch Paus gemeinsam mit den Projektpartnern auf dem Testgelände der Firma Konecranes fortgesetzt und abgeschlossen. Neben Testfahrern der beteiligten Hersteller kamen auch erfahrene Fahrer der beteiligten Terminalbetreiber bereits in dieser Projektphase zum Einsatz.

Die erforderlichen Feineinstellungen des elektrisch angetriebenen hydro-/pneumatischen Kombinationsaggregates zum Antrieb der Nebenverbrauchs-Systeme – es tritt beim Terminal Truck an die Stelle der sonst üblichen Nebenabtriebe des Dieselmotors – wurden vorgenommen. Dieses Aggregat versorgt auch das Bremssystem des Fahrzeugs mit Energie. Das Bremssystem wurde im Zuge der Tests anhand eines umfangreichen Meßprogramms auf Grundlage der ECE-R 13 validiert. Das Füllzeit- und das Schaltzeitverhalten des Bremssystems entsprechen in vollem Umfang den Anforderungen.

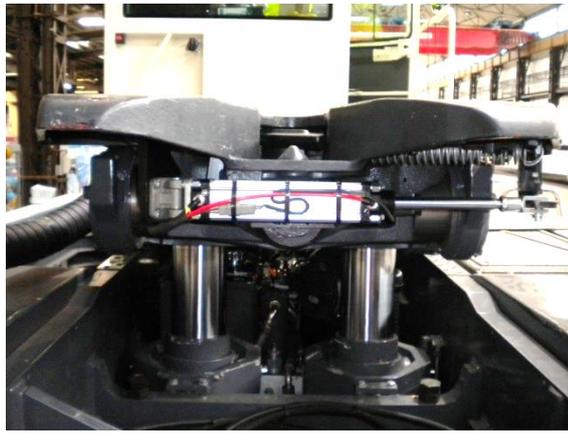
Stellvertretend für alle durchgeführten Bremstests zeigt das nachfolgende Bild charakteristische Systemgrößen einer manuell ausgelösten Vollbremsung ohne Sattelaufleger / ohne Zuladung aus Höchstgeschwindigkeit (35 km/h) auf nasser Fahrbahn (Beton und Asphalt). Das untere der drei Diagramme zeigt die Pedalkraft am Bremspedal als Funktion der Zeit und das obere den zeitlichen Verlauf der Fahrzeuggeschwindigkeit (Abnahme von 35 km/h auf 0 km/h in drei Sekunden). Das mittlere Diagramm stellt die für die Beurteilung relevanten Systemdrücke dar.

Aufgrund der Lasterfassung im unteren Teillastbereich erfolgt eine Bremskraftabsenkung, um ein zu starkes Überbremsen zu vermeiden. Hier galt es das Systemverhalten bei verschiedenen Einstellhöhen zu verifizieren. Die unterschiedlichen Einstellhöhen ergeben sich durch die unterschiedlichen Reifengrößen wie sie im Feldbetrieb bei den Projektpartnern Neuss Trimodal und CTA gefahren wurden. Wie die Untersuchungen gezeigt haben, verhielt sich das Bremssystem hinreichend tolerant gegenüber den unterschiedlichen Einstellhöhen, d.h., die Istwerte liegen im Limit.

- Umfangreiche Testfahrten auf dem TPS Versuchsfeld durch Truckfahrer von CTA (Januar 2015)
 - Allgemeiner Eindruck:
 - Gute Beschleunigung
 - Gutes Fahrverhalten, liegt straff auf der Straße, Fahrwerk wird jedoch auch als eher hart empfunden (Bodenunebenheiten sind im Fahrerhaus deutlich zu merken). Diese Punkte lassen sich ggf. auch auf die kleineren Reifen für NTM zurückführen.
 - Angenehmes, ruhiges Fahrgeräusch
 - Angenehmer Fahrersitz
 - Optisch wirkte der Truck auf den ersten Blick in der Werkshalle länger und breiter als die Terberg-Trucks bei CTA. Dieser Eindruck wurde später relativiert, als der Truck mit angekoppeltem Trailer auf dem Testgelände stand.
 - Die im Vergleich zum Terberg-Truck kürzere Kabine führt ggf. dazu, dass der Truck länger wirkt.
 - Beide Fahrer können sich vorstellen, den Truck über einen längeren Zeitraum bei CTA zu erproben.
 - Verbesserungsvorschläge:
 - Die Kabine ist (zum Erreichen des kleinstmöglichen Wendekreises und aufgrund des L-förmigen, die Refu-Umrichter enthaltenden Schaltschranks) relativ eng. Dies wurde von einem Fahrer vor allem beim Ein- und Aussteigen beobachtet. Vor allem bei großgewachsenen Fahrern sind die Platzverhältnisse zwischen Armaturenbrett und Knie auf der rechten Seite sehr eng. Bei einem Serienmodell sollte darauf geachtet werden, dass der gleiche Freiraum wie auf der linken Seite zur Verfügung steht. Ggf. müssen die Schalter anders verteilt werden. Bezüglich des Schaltschranks sollte angestrebt werden, Bauraum durch weiterentwickelte, kleine Umrichter zu sparen.
 - Der Lenkeinschlag und der Wendekreis wirken beim Fahren vergleichbar mit den bei CTA vorhandenen Maschinen. Die Manövrierfähigkeit kann aber erst final beurteilt werden, wenn der Truck auf dem Terminal im Einsatz ist.
 - Der Wischbereich des Scheibenwischers ist zu klein. Auf der rechten Seite ist die Sicht dadurch schlecht. Der Wischbereich des hintern Scheibenwischers passt ebenfalls nicht zu dem Sichtfenster des Fahrers.
 - Die Maximalgeschwindigkeit beim Rückwärtsfahren war zu langsam.
 - Das Anfahren beim Rückwärtsfahren sollte besser dosierbar sein. Es war schwierig den Trailer sanft anzukoppeln.
 - Einmal wurde gemeldet, dass die Sattelplatte verriegelt ist, obwohl der Königszapfen nicht in der Sattelplatte saß.
 - Die Sattelplatte hebt bei den Terberg-Trucks bei CTA ist deutlich schneller.

Unmittelbare Schlußfolgerungen aus diesen Ersterprobungen:

Im Verlauf der Testfahrten, in denen typische Betriebsabläufe zum An- und Abkuppeln von Sattelaufliegern nachgebildet wurden, zeigte sich die Leistungsfähigkeit der Maschine. Die Fähigkeit der Maschine, stark abzubremesen, ermöglicht in Kombination mit dem Ansprechverhalten der Fahrmotorregelung schnelle Anfahrvorgänge. Wegen des stärkeren Beschleunigungsverhaltens des elektrischen Fahrantriebs im Vergleich zu einem dieselmotorischen Antrieb liegt hier ein spezifisch anderes, antriebsabhängiges Verhalten im Betriebsablauf vor. Aus dieser Erkenntnis heraus wurde das System Sattelplatte konstruktiv optimiert: für den Öffnungs- und Schließmechanismus wurden Hebelverhältnisse optimiert, der pneumatische Entriegelungszyylinder wurde um eine aktive Schließfunktion ergänzt, und die Toleranz des Schaltpunktes des Diagnosesensors reduziert (Bild). Dadurch wurde erreicht, dass die Sattelplatte in kürzester Zeit verriegelt und dieser Zustand über die Sensorik in jedem Fall sicher erkannt und dem Fahrer signalisiert wird.



Einige kleinere Optimierungen im Umfeld der Kabine zu Sichtverhältnissen wurden ebenfalls durchgeführt. Hierzu zählt die Verbesserung des Scheibenwischfeldes der Frontscheibe ebenso wie der Anbau eines zusätzlichen Spiegels.

Weitere Vorkommnisse:

- Kurzschluss im Kühlsystem des mittleren Batterietrags (April 2015)
- Störungen im CAN-Bus durch eine Balancerplatine im rechten seitlichen Batterietrog (Juni 2015)
- Überführung des BTT in den Feldtest bei NTM (Juli 2015)
- Entscheidung über eine Projekterweiterung durch eine alternative Batterie (September 2015)
- Defekter DC/DC-Wandler zur Versorgung der 24V-Bordnetzbatterie (Oktober 2015)
- Behördliche Erlaubnis für die Fahrt über eine terminalnahe öffentliche Straße, TÜV-Abnahme (Dezember 2015)
- Zwischen Weihnachten und Neujahr 2015 wurde der BTT von NTM dann betrieblich genutzt



Im Allgemeinen wurden im Jahr 2015 viele, kleinere Optimierungsmaßnahmen durch TPS, Paus und REFU am BTT und seinen Komponenten vorgenommen. Alle Kooperationspartner waren bemüht den BTT endlich einem aussagefähigen Feldtest zuzuführen.

Die Projekterweiterung mit der alternativen Batterie gestaltete sich aus Hardware und vor Allem aus Softwaresicht unerwartet komplex. Der erste Zeitverzug resultierte daraus, dass die einzelnen Tröge nicht rechtzeitig fertiggestellt werden konnten, was durch Lieferengpässen von Zulieferern des Batterielieferanten begründet werden kann. Zur ersten Wiederinbetriebnahme des BTT im Januar 2016 stand nur Trog 1 (Seitentrog) zur Verfügung, mit dem die Inbetriebnahme und die Abstimmung zwischen dem Batterielieferanten und Refu Elektronik (Ladegerät) begonnen wurde.

Die mechanische Integration der Batterien war ohne Probleme, die drei einzelnen Tröge waren direkt in das Gerät einsetzbar. Bei der Inbetriebnahme traten EMV-Probleme im Bereich der CAN-Bus-Verbindung zum Truck auf. Durch eine unzureichende Ausführung der trog-internen Verdrahtung traten regelmäßig Kommunikationsaussetzer auf, die eine konstante Verbindung zwischen der Batterie und dem Truck unmöglich machten. Der Versuch seitens des Batterielieferanten dies durch Einschleifen eines Opto-Kopplers, zwecks galvanischer Trennung, in die Datenverbindung

zu beheben, war nicht erfolgreich. Erst die Rücksendung zum Batterielieferanten mit dem Ziel die Trog interne Masseverkabelung zu überarbeiten führte zum Ziel.

Beim Batterielieferanten wurde zwischenzeitlich der Trog 3 (Seitentrog) gemäß den gefundenen Verbesserungsmaßnahmen fertiggestellt und für die weitere Inbetriebnahme eingesetzt.

Ebenfalls langwierig gestaltete sich die Abstimmung zwischen Refu und dem vom Batterielieferanten eingeschalteten Softwarelieferanten hinsichtlich des Ladevorganges. Die Batteriesoftware und die Ansteuerung des Ladegeräts musste auf das ursprüngliche Protokoll der Refu-Batterien abgestimmt werden, was mehrere Iterationsschleifen erforderte.

Des Weiteren musste die Batteriesoftware auf die Funktionalität mit den schlussendlich vorhandenen 3 Batterietrögen abgestimmt werden. Im Betrieb ist es erforderlich, dass unterschiedliche Ladezustände (Spannungsdifferenzen) durch Zu- bzw. Abschalten einzelner Tröge aufgefangen werden und somit größere Ausgleichsströme vermieden werden. Beim Laden der Batterien muss bei größeren Spannungsdifferenzen, ebenfalls zuerst der schwächste Trog auf das Niveau des oder der anderen Tröge gebracht werden. Anschließend sollen dann alle Tröge gemeinsam vollständig geladen werden. Diese Funktionalität konnte erst nachträglich während der Inbetriebnahme in Düsseldorf zufriedenstellend implementiert werden.

Ende September 2016 konnte die Funktionalität um die Batterien und das Ladegerät endgültig finalisiert werden und die Fortsetzung des Feldtestes im Terminal Neuss begonnen werden. Die Dauer des Feldtestes war auf rund 3 Monate begrenzt, der BTT wurde Anfang Januar 2017 ins Werk Düsseldorf zurückgeholt um von CTA gewünschte Ergänzungen durchzuführen.

AP8 – Testbetrieb CTA / Neuss Trimodal

Testbetrieb bei Neuss Trimodal

Wie oben erwähnt war der BTT zum Jahreswechsel 2015/2016 bereits bei NTM in Betrieb. Der wesentliche Testbetrieb in Neus ging jedoch erst am 20.09.2016 los, nachdem das Fahrzeug mit dem neuen Batteriesystem ausgestattet wurde und im Konecranes Werk erneut in Betrieb genommen worden ist. Der Testbetrieb wurde durch einen wöchentlichen, informellen Kontakt mit dem federführenden Projektpartner, Konecranes, und situativ-gelegentlichen Kontakt mit dem betreibenden Projektpartner, Neuss Trimodal, begleitet.

Das Terminal in Neuss macht sowohl Umschlag am Rheinkai, mit einer größeren Bahnanbindung, als auch zu verschiedenen Spediteuren im Lkw-Verkehr. Verschiedenste Ladungseinheiten wie ISO-Container, Wechselaufbauten und Sattelanhänger werden zwischen den drei Verkehrsträgern ausgetauscht und müssen hierzu auf unterschiedlichsten Strecken von 100 bis 1.500m innerhalb des Terminals umgesetzt werden. Der Transport der Sattelanhänger wurde mit dem Terminal Truck durchgeführt. Die folgende Abbildung zeigt typische Fahrstrecken, die der BTT auf dem Terminal zurückgelegt hat. Die Fahrstrecken wurden mittels GPS aufgezeichnet.

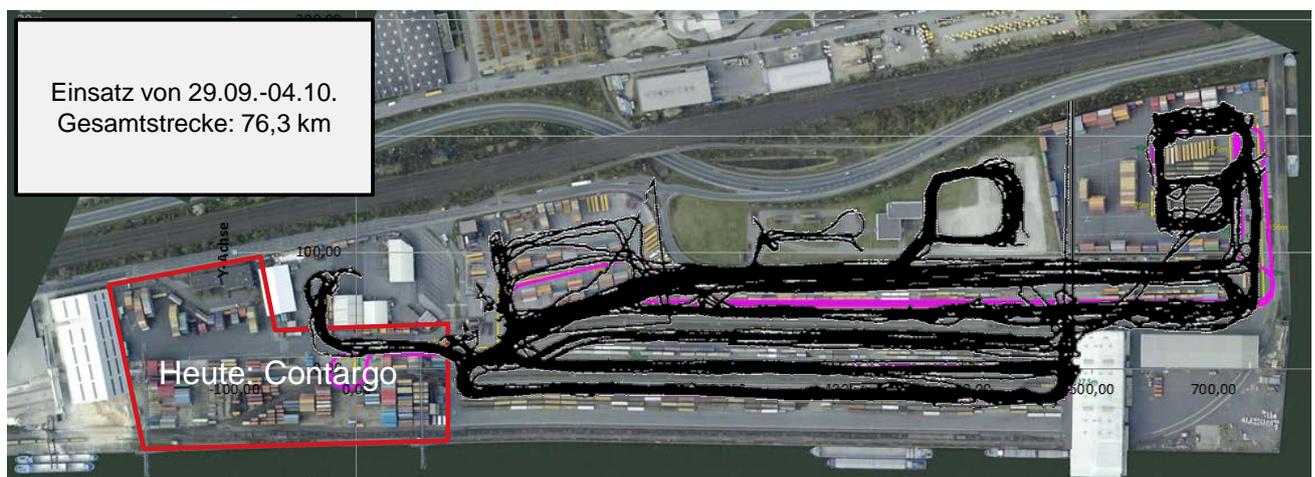


Abbildung typische Fahrstrecken des BTT bei NTM

Während des Testbetriebs wurden wesentliche Fahrzeug- und Batteriedaten mittels eines Dataloggers mit einer Frequenz von 10 Hz aufgezeichnet. Vom 20.09.2016 bis zum 17.11.2016 wurden insgesamt 6 Datensätze ausgelesen. Die einzelnen Datensätze enthalten zwischen 10 h und 73 h Betriebsdaten, d.h. der BTT (und damit der Datalogger) war in den jeweiligen Zeiträumen zwischen 10 h und 73 h eingeschaltet. Insgesamt wurden etwa 190 Betriebsstunden hinsichtlich maximaler, minimaler und durchschnittlicher Kennzahlen ausgewertet. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über einen typischen Datensatz:

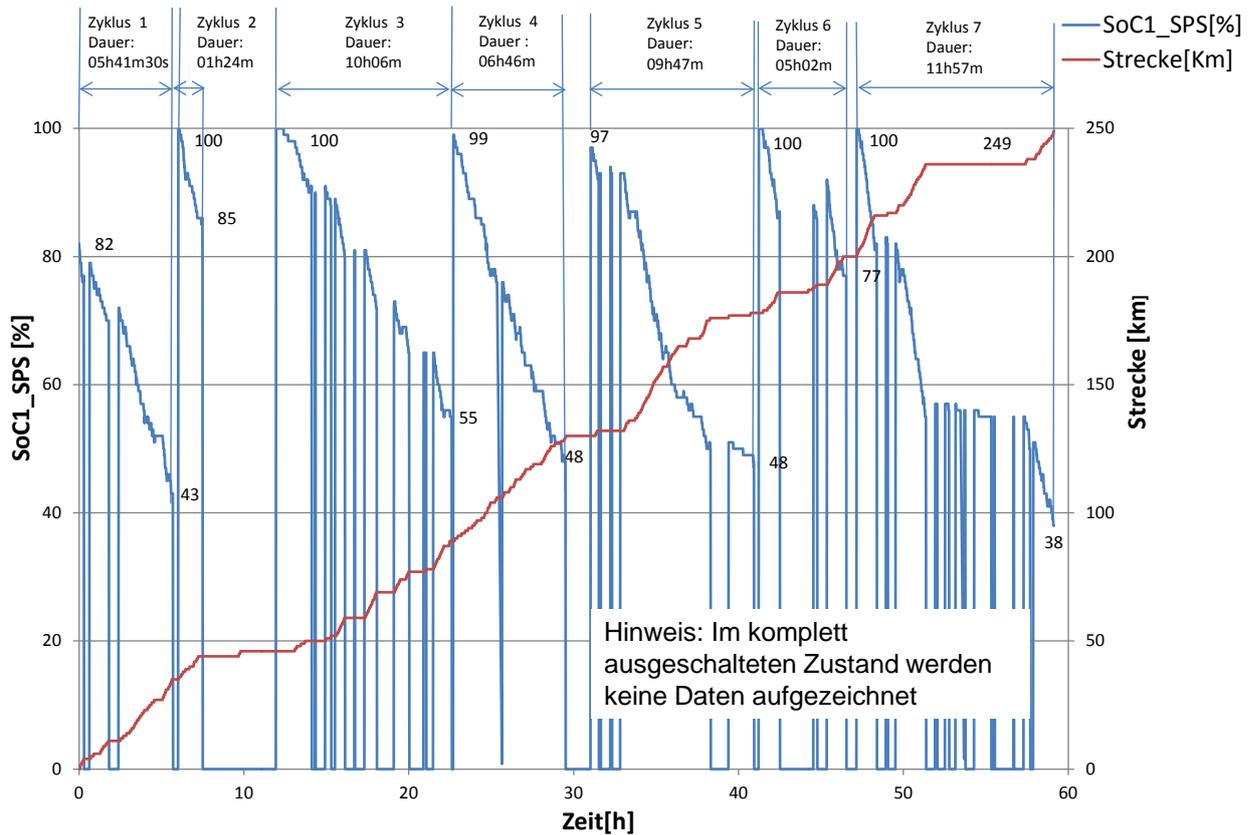


Abbildung Datensatz vom 28.10.2016 (nicht alle Daten dargestellt)

Jeder Datensatz wurde in sogenannte Zyklen aufgeteilt, die eine Batterieentladung repräsentieren. Die folgenden Datentypen wurden aufgezeichnet:

- Geschwindigkeit
- Fahrstrecke
- State of Charge Batterie
- Batteriestrom (= Gesamtstrom im Zwischenkreis)
- Batteriespannung (= Gesamtspannung im Zwischenkreis)
- Elektrische Leistung (Produkt aus Strom und Spannung)
- Drehzahl und Drehmoment Fahrmotor (zur Plausibilitätsprüfung)
- Mechanische Leistung

Beispiel Zyklus 1 des Datensatzes vom 28.10.2016

Für jeden Zyklus erfolgte eine Auswertung der Daten um typische Kennzahlen abzuleiten. Dies wird am Beispiel des folgenden Zyklus erläutert.

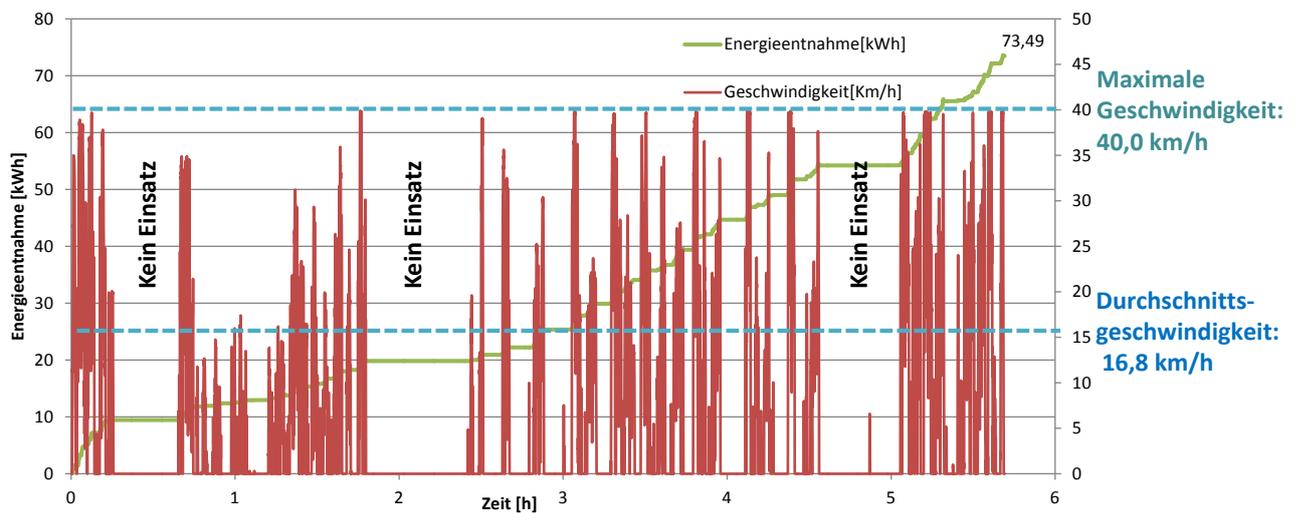


Abbildung Zyklus 1 des Datensatzes vom 28.10.2016

Der Zyklus erstreckt sich über 5,7 h. Dabei gab es drei signifikante Einsatzpausen. Zwischen den Einsatzpausen liegen Zeiträume, in denen der BTT im Einsatz ist. Auch während des Einsatzes kommt es immer wieder zu kurzen Stillstandszeiten, beispielsweise wenn auf ein anderes Fahrzeug, einen Kran oder den nächsten Transportauftrag gewartet wird. Folgende charakteristische Kennzahlen wurden für den Zyklus ermittelt:

- Fahranteil = 41% (davon ca. 14% Beschleunigen, 14% abbremsen und 13% Konstantfahrt)
- Stehanteil = 59%
- Fahranteil / Stehanteil ohne Berücksichtig der Einsatzpausen : 55% / 45%
- Fahrstrecke: 35,7 km
- Entladene Energie aus der Batterie: 73,5 kWh
- Durchschnittliche Leistung: 12,9 kW (inkl. der Einsatzpausen)
- Prognostizierte Nutzungsdauer BTT: 14 h (bei 180 kWh nutzbarer Energiemenge pro Batterieladung)

Da die „prognostizierte Nutzungsdauer“ stark von der Länge der Einsatzpausen abhängt ist diese nur bedingt geeignet um für andere Szenarien die Nutzungsdauer des BTT zu ermitteln. Aus diesem Grund werden folgende Kennzahlen zusätzlich aus den Dataloggerdaten abgeleitet:

- Durchschnittsgeschwindigkeit beim Fahren ($v > 0$) = 16,81 km/h
- Durchschn. Leistung beim Fahren ($v > 0$) = 33,7 kW
- Durchschn. Leistung im Stillstand ($v = 0$) = 5,54 kW

Ermittelte Kennzahlen bei Neuss Trimodal

	1.Zyklus	2.Zyklus	3.Zyklus	4.Zyklus	5.Zyklus	6.Zyklus	7.Zyklus	Durch.
Fahranteil [%]	38,30	46,84	25,73	39,42	28,61	26,09	25,35	32,91
Zykluszeit [min]	341,50	84,00	606,00	406,00	587,02	302,00	717,00	434,8
Stunden/Zyklus	5,69	1,40	10,10	6,77	9,78	5,03	11,95	7,25
Durchschnittsgeschwindigkeit bei v>0 [km/h]	16,81	13,03	16,85	15,81	17,73	17,52	16,35	16,3
Durchschn. Leistung [kW]	12,91	11,39	7,45	12,19	10,09	9,93	9,90	10,6
Durchschn. Leistung beim Fahren (v>0) [kW]	33,7	31,4	28,9	30,9	36,9	38,0	39,1	33,9
Durchschn. Leistung im Stillstand (v=0) [kW]	5,54	6,88	2,95	7,25	7,04	2,91	3,05	5,1
Batterie-Nutzungszeit für 180kWh [h]	13,94	15,80	24,16	14,77	17,84	18,13	18,18	17,6
Fahrstrecke [km]	35,7	8,4	42,7	41,1	48,3	22,4	48,2	35,26
Reichweite für 180 kWh [km]	87,4	94,9	102,1	89,7	88,1	80,7	73,3	88,0

Die wesentlichen Kennzahlen sind der durchschnittliche Verbrauch von 34 kW beim Fahren, der Nebenverbrauch von ca. 5 kW sowie die erzielbare Reichweite von mehr als 85 km. Bei einem typischen Einsatz in Neuss können deutlich mehr als 17 h Einsatz pro Batterieladung erzielt werden, wenn mit ähnlichen Einsatzpausen zu rechnen ist.

Aus diesen Kennzahlen kann prinzipiell der Verbrauch für eine zukünftige Anwendung abgeschätzt werden. Leider konnte keine Auswertung bzgl. des transportierten Gewichts getätigt werden, da hierzu keine Messwerte vorlagen. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass bei den Transporten in Neuss und im CTA ein repräsentatives durchschnittliches Containergewicht transportiert wurde.

Überprüfen der Auslegungskennzahlen

Neben den oben beschriebenen Einsatzkennzahlen wurden verschiedene Auslegungskennzahlen überprüft. Das folgende Diagramm zeigt einen Ausschnitt aus einer typischen Fahrsituation. Zu Beginn wird das Fahrzeug beschleunigt. Es folgen ein Abbremsen und ein erneuter Beschleunigungsvorgang.

Beim Beschleunigen werden Motorströme von 550 A erzielt. Die Motorleistung liegt dann bei 270 kW, das Drehmoment liegt bei 1280 Nm. Diese Werte liegen nahe an den maximalen Werten des Fahrmotors. Dies zeigt, dass der bestehende Motor gut ausgenutzt wird, ohne aber dass einzelne Werte in kritische Bereiche kommen.

Mit diesen Werten lässt sich die erwartete Beschleunigung des BTT auch in der Praxis erzielen. Das folgende Diagramm zeigt die berechnete und die real erzielte Zeit, die der BTT benötigt um bis auf 35 km/h zu beschleunigen. Die Zeiten stimmen gut überein. Die Praxistests und das Feedback der Truckfahrer bestätigen, dass die erzielte Beschleunigung sich für den regulären Einsatz gut eignet. Der BTT ist in diesem Punkt sogar den konventionellen Zugmaschinen etwas

überlegen, was vermutlich weniger an der eigentlichen Motorleistung liegt, sondern daran, dass das max. Drehmoment schon bei geringen Drehzahlen zur Verfügung steht und keine Zeit bei Schaltvorgängen verloren geht.

Bei der IBN wurde eine Geschwindigkeit von 40 km/h erzielt. Dieser Wert ist als maximaler Grenzwert eingestellt, um innerhalb des zulässigen Motordrehzahlbereichs zu bleiben. Die erlaubte Spitzengeschwindigkeit auf den Terminals liegt mit 25 km/h deutlich darunter.

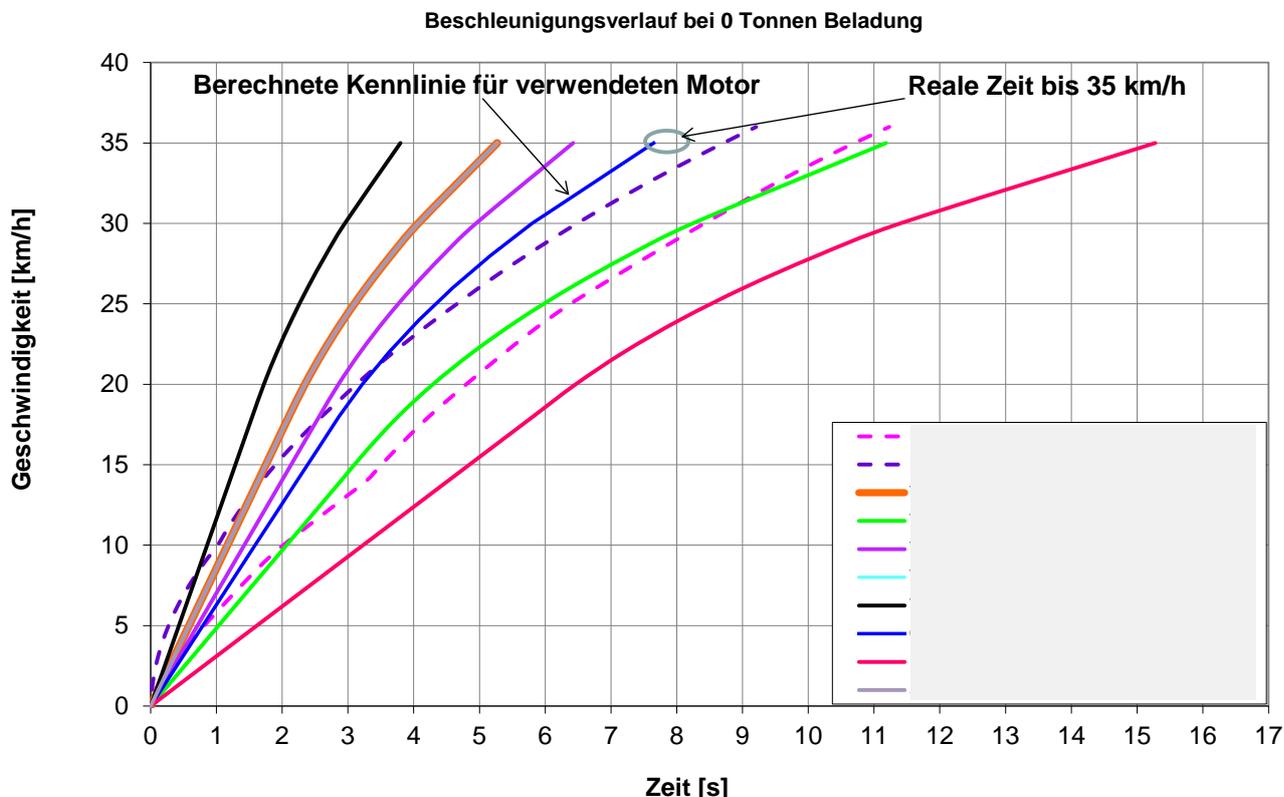


Abbildung Berechnete und reale Beschleunigungszeit

Ebenfalls überprüft wurden die Batteriespannung und der Batteriestrom, die sich beim Einsatz des BTT ergeben. Das folgende Diagramm zeigt einen typischen Spannungsverlauf während eines Einsatzzyklus. Im vollgeladenen Zustand (SOC = 100%) liegt die Leerlaufspannung der Batterie, die sogenannte Open Circuit Voltage (OCV), bei ca. 680 V. Je nach Entladestrom fällt die Zwischenkreisspannung um einige Volt relativ zur OCV ab. Wird der BTT elektrisch abgebremst, so arbeitet der Fahrmotor generatorisch und die Stromrichtung im Zwischenkreis dreht sich um. In diesem Fall steigt die Zwischenkreisspannung relativ zur OCV. Insgesamt schwankt die Zwischenkreisspannung um ca. 25 V relativ zur OCV (ca. +5 V und -20 V).

Bei den Feldversuchen betrug die max. gemessene Spannung bei 691 V. Die minimale Spannung lag bei 630 V. Dieser Spannungsbereich ist für die Verbraucher im Zwischenkreis unkritisch und für den Betrieb des BTT gut geeignet. Auch wenn die Batteriespannung noch um ca. 20-30 V weiter sinken sollte, z.B. aufgrund von tieferen Temperaturen, Alterungseffekten oder noch stärkerer Entladung, ist die Batterie immer noch für den Einsatz geeignet.

Der maximale batterieseitige Entladestrom (nicht zu verwechseln mit dem Motorstrom) lag kurzfristig bei ca. 600 A und trat bei der Inbetriebnahme beim Beschleunigen auf bis zu 40 km/h auf. Im realen Einsatz lagen die max. Entladeströme i.d.R. unterhalb von 400 A. Bei der Batteriekapazität von 360 Ah, liegt die maximale, kurzfristige Entladerate in der Regel bei nur etwas über 1 C (bezogen auf 400 A) bzw. bei ca. 1,7 C (bezogen auf 600 A). Beide Werte sind für die Batterie unkritisch, zumal die durchschnittliche Entladerate bei nur bei einem Bruchteil von 1 C liegt. Es wird deutlich, dass die entscheidende Auslegungsgröße für die Batterie die Gesamtkapazität bzw. die Energiemenge war und nicht die elektr. Leistung.

Die für die Batterie unkritischen Ströme wirken sich i.d.R. positiv auf die Erwärmung und die Lebensdauer aus, sodass davon ausgegangen werden kann, dass der Einsatz aus elektr. Sicht für die Batterie eher schonend ist. Ein weiterer positiver Effekt ist, dass der Einsatz des BTT auch dann noch mit voller Fahrleistung möglich ist, wenn ein bis zwei Batterieblöcke (von insgesamt 6) ausgefallen sein sollten und sich die Batteriekapazität entsprechend verringert.

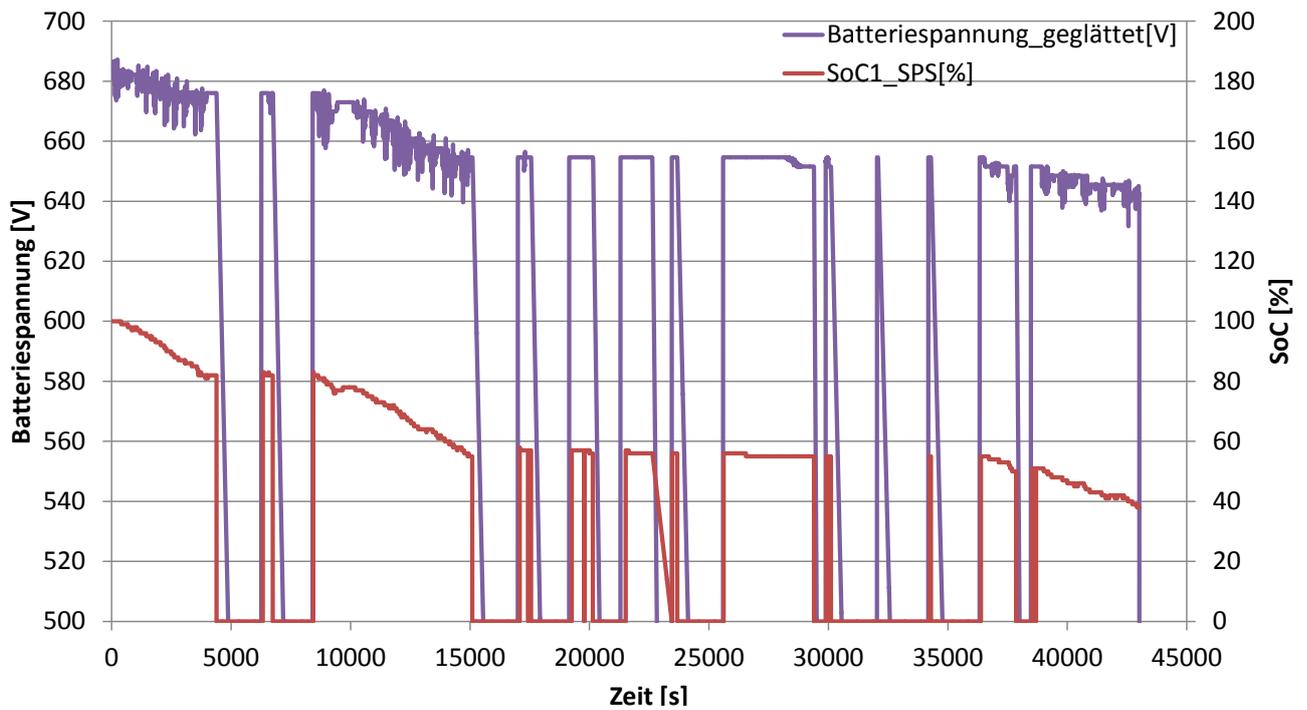


Abbildung Batteriespannung

Eine weitere untersuchte Kenngröße war die Energierückgewinnung. Hierzu wurde für ausgewertet, wie viel elektrische Energie bei den jeweiligen Zyklen wieder in die Batterie eingespeist wird. Das untenstehende Diagramm zeigt einen beispielhaften Zyklus. Es wurden ca. 26 kWh Energierückgewinnung im Zwischenkreis gemessen. Dies sind ca. 1/3 vom gesamten elektrischen Verbrauch von 73 kWh. Diese Energie wird wieder in die Batterie geladen, wobei ein gewisser Wirkungsgradverlust vorhanden ist. Bei einem Fahrzeug, das mit Verbrennungsmotor betrieben wird, würde diese Energie vollständig in Verlustwärme umgesetzt.

Die Rekuperation von Bremsenergie scheint in der Praxis gut zu funktionieren. Dies zeigt auch, dass die Fahrer der Vorgabe gut Folge leisten konnten, in normalen Fahrsituation möglichst mit der Motorbremse regenerativ zu verzögern (Fuß vom „Gaspedal“ heben) und die Druckluftbremse nur wenn nötig hinzuzuziehen (Bremspedal betätigen).

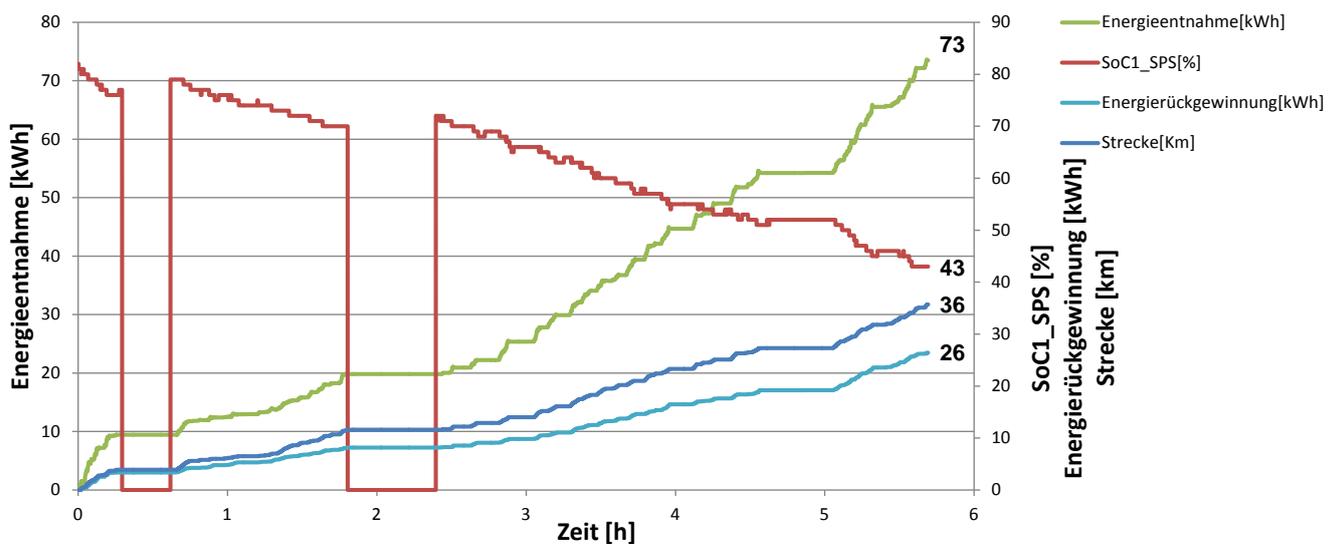


Abbildung Energierückgewinnung

Sonstige Aspekte des Probetriebs bei Neuss Trimodal

Eine weiterführende Erkenntnis aus dem Probetrieb besteht in der Feststellung, dass die Arbeitsgeschwindigkeiten der Sattelhubeinrichtung gesteigert werden sollen. Hier war im Rahmen der Entwicklung zunächst der Ansatz verfolgt und im Arbeitspunkt 6 – Aufbau – umgesetzt worden, mit einfachwirkenden Hydraulikzylindern die Herstellkosten im Hinblick auf die Marktfähigkeit zu minimieren. Die Erfahrung aus dem Testbetrieb zeigte jedoch die Notwendigkeit, mit doppelwirkenden Hydraulikzylindern und einer veränderten Einstellung des Kombinationsaggregates zum Antrieb der Nebenverbrauchs-Systeme höhere Geschwindigkeiten zu realisieren. Hierfür hat PAUS das erforderliche Engineering durchgeführt und im Januar 2016 während der durch den Wechsel der Batterien bedingten Stillstandszeit im Hause Konecranes umgesetzt. Hierfür wurden die zuvor verwendeten einfachwirkenden Hydraulikzylinder aus- und die neu angefertigten doppelwirkenden Hydraulikzylinder im Terminal Truck ebenso wie die für die Ansteuerung erforderliche Ventiltechnik eingebaut. Zusammen mit dem Projektpartner Konecranes wurden die erforderlichen Änderungen der Ansteuerung des Antriebsaggregates an dessen Schnittstelle zum Projektanteil der Fa. Konecranes vorgenommen. Diese wurden in Wechselwirkung mit dem veränderten Hydrauliksystem zunächst „im Stand“ des Terminal Trucks lastfrei getestet und später dann als Teil des weiteren Testbetriebes beim Projektpartner Neuss Trimodal unter Betriebslast. Sowohl bei den Messungen „im Stand“ wie auch im späteren Testbetrieb unter Realbedingungen bestätigte sich die Auslegung; die neuen Vorgaben wurden erreicht.

Testbetrieb bei CTA

Im zweiten Teil des Feldversuchs wurde der Terminal Traktor zusammen mit der Li-Ion-Batterie umfangreich im Container Terminal Altenwerder getestet. In dem Versuchszeitraum von Juni bis Dezember 2017 wurde das Fahrzeug zum Transport von Containern zwischen Lager und Eisenbahnterminal eingesetzt. Die Betriebsart zeichnet sich aufgrund der geringen Wartezeiten und der häufigen Abbrems- und Beschleunigungsvorgänge durch eine sehr hohe Beanspruchung des Fahrzeugs aus. Die Trailer werden im CTA generell vom Terminal Truck abgekuppelt und dienen als Pufferlager im Bahnterminal.

Innerhalb dieses Versuchszeitraums wurden – wie auch in Neuss – regelmäßig Betriebsdaten über einen Datalogger aufgezeichnet. Aus den Dataloggerdaten wurden insgesamt 11 Einsatzzeiträume ausgewählt und ausgewertet. Die Einsatzzeiträume zeichnen sich dadurch aus, dass der BTT dabei unterbrechungsfrei betrieben wurde. Die Zeiträume sind zwischen 1 h und 3 h lang und repräsentieren einen typischen Einsatz bei CTA.

Ermittelte Kennzahlen bei CTA

Wie auch bei NTM wurden bei CTA Durchschnittswerte für typische Einsatzkennzahlen ermittelt, die den Betrieb des BTT charakterisieren.

Kennzahl	Durchschnitt bzw. Max/Min
Dauer der ausgewerteten Einsatzzeiträume [h]	1,64
Zurückgelegte Strecke je Einsatzzeiträume [km]	18,69
Durchschnittsgeschwindigkeit (mit Stillstand) [km/h]	11,32
Durchschnittsgeschwindigkeit (ohne Stillstand) [km/h]	13,70
Fahranteil [%]	83%
Genutzter SOC [%]	16%
Verbrauchte Energie, aus elektr. Daten [kWh]	27,76
Rekuperierte Energie [kWh]	-4,70
Durchschnittliche Leistung (mit Stillstand)	16,87
Durchschnittliche Leistung (nur Fahren)	19,73
Max. Leistung [kW]	209,36
Min. Leistung [kW]	-71,47
Max. Batteriespannung [V]	679,93
Min. Batteriespannung [V]	657,13
Max. Strom [A]	313,96

Min. Strom [A]	-106,67
Theoretische Einsatzzeit bei 180kWh nutzbar [h]	10,67
Reine Fahrzeit bei 180kWh nutzbar [h]	9,12

Es fällt auf, dass der Einsatz bei CTA durch einen sehr hohen Fahranteil von über 80% bestimmt ist. Dies zeigt sich auch darin, dass die Durchschnittsgeschwindigkeit inkl. der Stillstandszeiten sehr nahe an der Durchschnittsgeschwindigkeit ohne Stillstandszeiten ($v > 0$) liegt. Die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit von 13,7 km/h deutet darauf hin, dass der BTT regelmäßig längere Strecken mit höherer Geschwindigkeit zurückgelegt hat. Im Vergleich zu NTM ist die Fahrgeschwindigkeit etwas geringer, was auch die geringere Durchschnittsleistung beim Fahren (CTA: 20 kW, NTM: 34 kW) mit erklärt.

Trotz des hohen Fahranteils liegt die theoretische Einsatzzeit mit der vorhandenen Batteriekapazität bei über 10 h. Somit kann eine etwa 3 h längere Einsatzzeit für CTA erzielt werden, als bei der Auslegung und Simulation im Voraus angenommen wurde (ca. 7 h).

Die maximalen und minimalen Werte für Strom, Spannung und Leistung liegen im erwarteten Bereich und zeigen, dass der elektrische Antriebsstrang für den Einsatz ausreichend dimensioniert ist.

Auch bei CTA konnten nennenswerte Energiemengen in die Batterie zurückgespeist werden. Durchschnittlich konnten etwa 17% der verbrauchten Energie beim Bremsen wieder zurückgewonnen werden. Wie auch bei NTM ist die rekuperierte Energie mit Wirkungsgradverlusten behaftet. Es wird angenommen, dass ca. 5%-10% der im Zwischenkreis gemessenen Bremsenergie beim Lade und Entladeprozess in Wärme umgewandelt werden. Physikalisch kann dies dadurch erklärt werden, dass beim Laden der Batterie und beim anschließenden Entladeprozess zwar die gleiche Kapazität umgesetzt wird, die Spannung beim Laden jedoch höher ist, als beim Entladen. Grundsätzlich gilt jedoch, dass die beim BTT rekuperierte Bremsenergie bei einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor über die mechanischen Bremsen vollständig in Wärmeverluste umgesetzt worden wäre.

Technische Bewertung des Testbetriebs bei NTM und CTA

Aus technischer Sicht kann der Testbetrieb durchaus positiv bewertet werden:

- Die technische Auslegung konnte erfolgreich validiert werden
- Der BTT zeigt ein gutes Fahrverhalten bzgl. Beschleunigung, Zugkraft und Geschwindigkeit
- Energieverbrauch und Rekuperation besser als erwartet
- Die erwarteten Einsatzzeiten pro Batterieladung konnten in der Praxis deutlich überschritten werden

Es haben sich jedoch auch noch einige verbesserungswürdige Aspekte herausgestellt:

- Zuverlässigkeit der Nebenfunktionen (z.B. Sattelplatte) müsste für einen Serieneinsatz verbessert werden
- Fahrkomfort muss verbessert werden
- Die Konstruktion muss wartungsfreundlicher und „aufgeräumter“ werden
- Die eingesetzte Batterie- und Ladegerätechnik muss auf einen Serienstand gebracht werden

Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Batterietechnik, z.B. die Verfügbarkeit von Zellen mit 50% mehr Kapazität bei gleichem Bauraum, begünstigen, dass der BTT zukünftig kompakter und aufgeräumter gestaltet werden kann.

AP9 – Ökologische Begleitforschung (bereitgestellt durch das ifeu)

Einleitung

Das ifeu-Institut begleitete das Vorhaben „Batterieelektrischer Terminal-Truck im Feldversuch“ aus Umweltsicht mit dem Ziel,

- einen Vergleich des batterieelektrischen Antriebs mit dem herkömmlichen Dieselantrieb unter gleichen Betriebsbedingungen vorzunehmen,
- dabei den gesamten Lebensweg der Fahrzeuge (Herstellung, Betrieb, Energiebereitstellung, Wartung, Entsorgung) zu berücksichtigen,
- wichtige Stellschrauben der Umweltbilanz zu identifizieren und
- Vorschläge für einen aus Umweltsicht vorteilhaften Einsatz des elektrischen Antriebs bei Terminal Trucks zu machen.

Zunächst wird die für die Bilanzierung verwendete Datengrundlage vorgestellt. Es folgt eine Darstellung wesentlicher Ergebnisse des Antriebsvergleichs und einiger Sensitivitätsbetrachtungen. Der Bericht zur ökologischen Begleitforschung schließt mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse und offenen Fragestellungen.

Fahrzeuge und Infrastruktur

Dieselbetriebener Terminal Truck (Referenzfahrzeug) und Trailer

Derzeit werden Terminal Trucks fast ausschließlich mit Dieselantrieb ausgerüstet, in der Regel mit einem mechanischen Schaltgetriebe. Weltweit sind etwa 50.000 Fahrzeuge im Einsatz. Für die Bilanzierung werden die technischen Daten der Dieselfahrzeuge zugrunde gelegt, die bei CTA in Hamburg im Einsatz sind. Nachfolgende Tabelle listet einige Eckdaten des hier angenommenen Referenzfahrzeugs auf. Da die Ausgestaltung des Trailers unabhängig vom Antrieb ist, wurde er bei der Bilanzierung der Fahrzeugherstellung nicht berücksichtigt.

Batterie-elektrischer Terminal Truck

Die Fahrzeuge werden so bilanziert, wie sie im Feldversuch zum Einsatz gekommen sind. Da es sich beim Batterie-Truck um einen Prototypen handelt, ist der Stahlbau vergleichsweise massiv ausgelegt worden. Für eine Serienfertigung wäre voraussichtlich eine deutliche Gewichtseinsparung möglich, die jedoch nicht quantifiziert werden konnte. Im Folgenden werden wesentliche Kenngrößen des B-TT-Prototyps dargestellt.

Ladevorgang und Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs

Die Batterien des Terminal Trucks wurden während des Feldversuchs mit einer Ladestation geladen, die eine maximale Leistung von 220 kW abgeben konnte. Im Feldversuch wurde jedoch mit geringeren Ladeleistungen gearbeitet (160 kW bei NTM, 94 kW bei CTA), woraus sich für eine Komplettladung eine Ladedauer von 1 h respektive 2 h ergab.

Die Ladeverluste im Ladegerät wurden von der Firma REFU mit etwa 3,3 % angegeben (7,5 kW Verlustleistung bei 220 kW Ladeleistung). Zudem treten Verluste in der Batterie auf, die sich für den Lade- sowie den Entladevorgang nach Angaben von REFU mit etwa 4 % abschätzen lassen. Die Verluste des Inverters wurden von REFU mit 5 % angegeben, die des Elektromotors laut Datenblatt mit 3 %. In Summe ist somit davon auszugehen, dass etwa 80 % der dem Netz entnommenen elektrischen Energie als mechanische Antriebsenergie für den Batterie-Terminal-Truck genutzt werden können.

Datenerhebung während des Feldversuchs

Während der Feldversuche wurden die Fahrdaten der jeweiligen batterieelektrischen Terminal Trucks in Neuss bei NTM und im Containerterminal in Altenwerder (Hamburg) bei CTA aufgezeichnet. Zu den erfassten Größen gehören u. a. die

- GPS-Position des Fahrzeugs,
- GPS-Geschwindigkeit,
- die Geschwindigkeit des Fahrzeugs über den Antriebsstrang,
- die Spannung der Traktionsbatterie,
- der SOC (Ladezustand) der Traktionsbatterie,
- die Drehzahl und das Drehmoment des Antriebsmotors,
- der Stromfluss zwischen Traktionsbatterie und dem Antriebsmotor,

- die Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher,
- die zurückgelegte Strecke und
- die Spannung des Niedervoltstromkreises.

Diese Daten wurden für die ökologische Begleitforschung ausgewertet mit dem Ziel, relevante Kennzahlen für die ökobilanzielle Betrachtung des Fahrzeugkonzeptes zu gewinnen. Zusätzliche sollten wesentliche Einflussparameter (z.B. Witterung) auf signifikante Betriebsparameter und damit letztlich den elektrischen Energieverbrauch identifiziert werden.

Feldversuch im Containerterminal Altenwerder (Jun. 2017 bis Nov. 2017)

Für den Feldversuchsteil bei CTA liegen für die Monate Juni bis November abschnittsweise Betriebsdaten von unterschiedlicher Aufzeichnungslänge vor. Insgesamt wurden Daten über einen Zeitraum von knapp 85 Stunden aufgezeichnet, die den Betrieb jedoch nur fragmentarisch abbilden. Die Aufzeichnungen wurden daher in einzelne Zyklen kontinuierlichen Betriebs unterteilt, wofür im Wesentlichen der Verlauf des SOC berücksichtigt wurde. Über die Entwicklung des SOC konnten zusammenhängende Betriebszeiten eindeutig identifiziert werden:

Stieg oder fiel der SOC zwischen den einzelnen Aufzeichnungsintervallen über den Schwellwert von einem Prozentpunkt, konnte entweder von einem Ladevorgang (bei Anstieg) oder einem Betrieb ohne Aufzeichnung (bei Abfallen) ausgegangen werden, entsprechend wurde ein neuer Zyklus zur Auswertung definiert. Einige Zyklen verlaufen damit jedoch auch über kürzere Betriebspausen hinweg, an denen aufgrund des abgeschalteten Fahrzeugs keine Verbräuche bzw. Datenpunkte aufgezeichnet wurden. Zur weiteren Analyse wurden nur Zyklen von mindestens 45 Minuten Betriebszeit verwendet. Es ist anzumerken, dass die für die Umweltbewertung vorgenommene Definition der Zyklen (Auswahl, Start und Ende) nicht vollständig mit der in AP 8 vorgenommenen Einteilung übereinstimmt. Die resultierenden Kennwerte wurden aber verglichen und für die Ergebnisse ergeben sich keine wesentlichen Unterschiede.

Feldversuch bei Neuss Trimodal (Sept. 2016 bis Nov. 2016)

Bei den Messdaten des Terminal-Truck-Betriebs in Neuss bei NTM lagen keine Zeitstempelinformationen zu den einzelnen Messpunkten vor. Diese Daten konnten daher nur eingeschränkt ausgewertet werden, insbesondere kann hier die vorherrschende Außentemperatur nicht abgeleitet werden und es können somit keine Rückschlüsse auf eine eventuelle Witterungsabhängigkeit des Verbrauchs gezogen werden.

Die Zeitintervalle zwischen den Messpunkten wurden für die weitere Auswertung als Ein-Sekundenschritte antizipiert. Die Aufbereitung der Messdaten in Form von Zyklen erfolgte analog der Daten für CTA. Hierdurch entfielen beispielsweise Zyklen mit sehr geringer Fahrtstrecke und weit überdurchschnittlich langen Standzeiten mit eingeschalteten Nebenverbrauchern oder mit sehr hohem Fahrtanteil bei hohen Geschwindigkeiten. Darüber hinaus wurden die Zyklen mit den kürzesten und längsten zurückgelegten Strecken nicht berücksichtigt, um eine zu CTA vergleichbare Stichprobengröße von 30 Zyklen zu bekommen. Die Betriebszeiten der einzelnen Zyklen liegen zwischen einer und bis zu vier Stunden bei im Schnitt 148 Minuten.

Typische Beladung eines Containers

Die von den Terminal Trucks transportierten Container weisen eine große Bandbreite an Beladungen auf (siehe Abbildung 1). Es ergibt sich ein mittleres Containergewicht von etwa 14 Tonnen. Die Daten wurden unabhängig vom Feldversuch und nur bei CTA erhoben. Für den genauen Zeitraum der Datenaufzeichnung während des Feldversuchs und für NTM liegen leider keine Angaben zur Beladung der Fahrzeuge vor, so dass diese theoretisch auch abweichen können. Der Einfluss der Beladung auf den Verbrauch der Fahrzeuge (und mögliche Unterschiede zwischen den Antrieben, die sich daraus ergeben) konnte daher leider nicht untersucht werden.

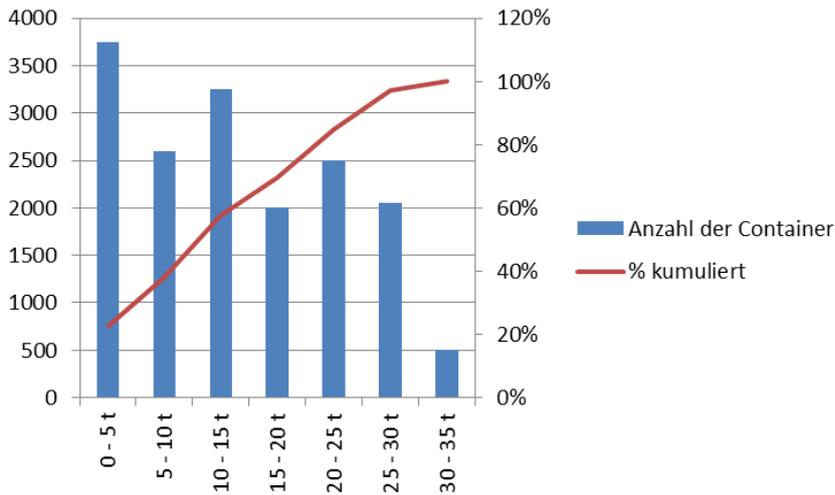


Abbildung 7: Verteilung des Containergewichts bei CTA (Quelle: CTA)

Zusammenfassung zur Datenerhebung im Feldversuch

Hintergrunddaten

Die Stoffstromberechnungen für die vergleichende Umweltbewertung von diesel- und batteriebetriebenen Terminal Trucks werden unter Berücksichtigung aller Lebenswegphasen der Fahrzeuge durchgeführt (siehe Abbildung 2):

- Fahrzeugherstellung
- Energiebereitstellung (Dieselkraftstoff bzw. Strom)
- Fahrzeugbetrieb (lokale Emissionen des Verbrennungsmotors)
- Wartung der Fahrzeuge
- Entsorgung zum Ende der Betriebszeit

Ebenso werden die jeweils vorgelagerten Prozesse berücksichtigt, wie beispielsweise die Rohstoffextraktion und Bereitstellung der Materialien für die Fahrzeugfertigung.

Für die Bilanzierung der Fahrzeugherstellung wird ein Modell verwendet, das im Rahmen des BMU-Projekts „Renewability III“ entwickelt wurde und im entsprechenden Abschlussbericht ausführlich beschrieben wird (http://www.renewability.de/wp-content/uploads/Renewability_III_Endbericht.pdf). Für die Bilanzierung des dieselbetriebenen Terminal Trucks wurde das Modell eines Lkw mit 40 t zGG (15,1 t Leergewicht) zugrunde gelegt und der Stahlbau entsprechend des Leergewichts des Terminal Trucks skaliert. Motor, Antriebsstrang und Abgasnachbehandlung wurden entsprechend der Motorleistung skaliert. Beim Batterie-Terminal-Truck entfallen diese Komponenten und es wird stattdessen ein Elektromotor der entsprechenden Leistungsklasse nebst Leistungselektronik angesetzt.

Zur Bilanzierung der NMC-Batterie lagen massenspezifische Industriedaten vor, die mit verschiedenen Literaturquellen abgeglichen wurden (Bauer 2010; Gaines and Dunn 2012; Hawkins et al. 2013; Majeau-Bettez, Hawkins, and Strømman 2011; Notter et al. 2010; Öko-Institut 2011). Die in der Batterie des Terminal Truck eingesetzte Materialmenge wird dann im Wesentlichen von der Kapazität und Energiedichte der eingesetzten Batterie bestimmt. Zur Herstellung der Batteriezellen konnten im Rahmen dieses Projekts leider keine Primärdaten erhoben werden, da der Zellhersteller nicht Teil des Projektkonsortiums war. Für die Entsorgung der Batteriezellen wird eine Verbrennung ohne Rückgewinnung der Zellmaterialien angenommen.

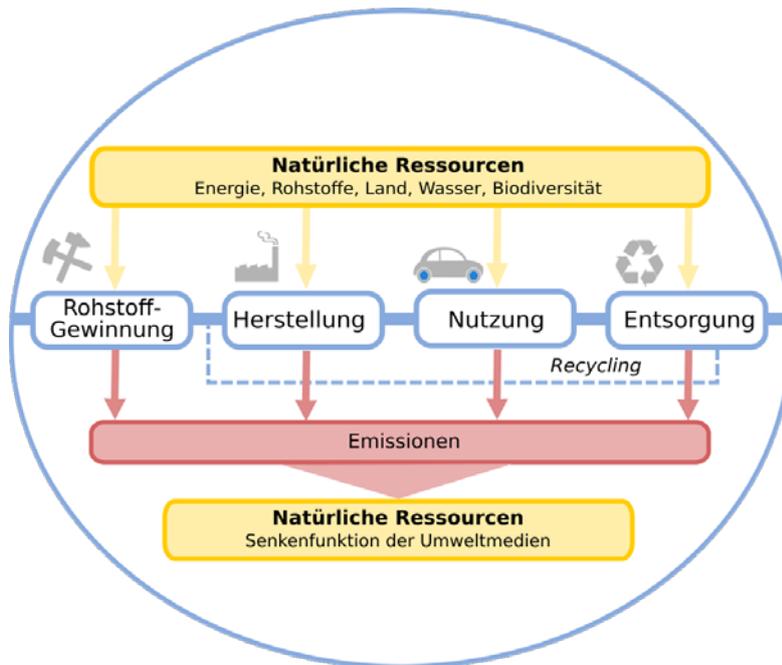


Abbildung 8: Bilanzrahmen der Umweltbewertung

Die einzelnen Prozesse im Stoffstrommodell entstammen der Ökobilanz-Datenbank EcoInvent in der Version 3.4. Für die Allokation wurde dabei der Cut-off-Ansatz gewählt; der Aufwand für die Aufbereitung recyclingfähigen Abfalls wird dabei den Prozessen zugeschlagen, die auf der Inputseite Sekundärmaterial beziehen. Bedingt dadurch ist eine bilanzielle Trennung von Fahrzeugherstellung und Entsorgung nicht sinnvoll möglich. Für die Rohstoffbereitstellung werden in EcoInvent jeweils statistische mittlere Anteile von Sekundärmaterial angesetzt.

Die Bereitstellung der Energieträger Strom und Dieselkraftstoff wird mithilfe entsprechender Module aus EcoInvent 3.4 abgebildet. Die Basisdaten für die Strombereitstellung in verschiedenen Ländern gehen auf Statistiken der IEA, (2017, IEA World Energy Statistics and Balances. OECD iLibrary, eISSN: 1683-4240, DOI: 10.1787/enestats-data-en) zurück. Für die Strombereitstellung in Großbritannien war der EcoInvent-Datensatz an einigen Stellen unplausibel, weswegen hier für die Bestimmung der CO₂-Emissionen stattdessen auf Daten zurückgegriffen wurde, die von ifeu für EcoTransit World berechnet wurden (https://www.ecotransit.org/download/EcoTransIT_World_Methodology_Data_Update_2018.pdf, Seite 96 ff). Für die Bereitstellung des Dieselkraftstoffs wird von rein fossilem Kraftstoff (ohne Beimischung von Biokraftstoffen) ausgegangen, der einer Entschwefelung unterzogen wurde.

Zum Schadstoffausstoß der Fahrzeuge wurden während des Feldversuchs keine Messungen durchgeführt. Praxisnahe CO₂- und Schadstoffemissionen des Dieselfahrzeugs während des Betriebs wurden daher auf Basis des Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) in der Version 3.3 (http://www.hbefa.net/d/documents/HBEFA33_Documentation_20170425.pdf) abgeschätzt, wobei das Fahrzeugsegment „TT/AT >50-60t“ mit einem Abgassystem nach Euro-IV mit Abgasrückführung (EGR) unterstellt wurde. Zwar sind die Terminal Trucks nach der Offroad-Emissionsklasse Tier 4i (entspricht der europäischen Norm IIIB) zugelassen, für diese liegen jedoch keine praxisnahen Emissionsfaktoren für dieses Einsatzmuster vor. Daher wurden Daten für die Euro-Norm IV für Lkw gewählt, die dem Standard IIIB grob entspricht. Das HBEFA stellt hier Emissionsfaktoren für die Verkehrssituation „URB/Access/30/St+Go“ zur Verfügung, die typischen Betriebsmustern von Terminal Trucks recht nahe kommt, siehe Tabelle 3.

Tabelle 3: Fahrprofile im Feldtest, verglichen mit der für die Emissionsberechnung zugrundeliegenden Verkehrssituation des Handbuchs der Emissionsfaktoren (HBEFA)

	mittl. Geschwindigkeit [km/h]	RPA [m/s ²]	Stillstandsanteil [%]
HBEFA 3.3 URB/Access/30/St+Go	11,8	0,1348	28,7 %
Feldversuch CTA	10,4	0,1045	23 %
Feldversuch NTM	7,5	0,1275	56 %

Die Wartung der Terminal Trucks wurde basierend auf den Wartungsaufwänden eines typischen Lkws (hinterlegt in Ecolnvent 3.4) abgeschätzt, wobei die deutlich niedrigeren mittleren Geschwindigkeiten der Terminal Trucks im Vergleich zu Straßenfahrzeugen berücksichtigt wurden. Die Zeitdauer des Feldtests reichte nicht aus, um belastbare Aussagen zu den Wartungsaufwänden der Batteriefahrzeuge zu treffen. Es wird daher angesichts der deutlich geringeren Anzahl von Verschleißteilen pauschal davon ausgegangen, dass sich die Wartungsaufwände gegenüber dem Dieselfahrzeug in etwa halbieren. Ein eventuell notwendiger Austausch der Traktionsbatterie ist hierbei nicht berücksichtigt und wird separat anhand deren Lebensdauer unter den jeweils angenommenen Einsatzbedingungen bilanziert.

Ergebnisse

Auswertung der Feldtestdaten

Fahrprofil und Verbrauch

Der Stromverbrauch des B-TT wurde auf Grundlage der aufbereiteten Feldtestdaten zunächst pro Betriebsstunde sowie pro Kilometer jeweils für die beiden Feldteststandorte CTA und NTM ermittelt. Es handelt sich hierbei um die gemessene Stromabgabe der Traktionsbatterie. Für die Umweltbewertung wird diese dann mittels der Wirkungsgradkette beim Laden / Entladen in einen Stromverbrauch ab Netz umgerechnet.

Bei den dieselbetriebenen Vergleichsfahrzeugen wurde im Rahmen des Projekts kein Datenlogging durchgeführt. Daher stehen hier nur mittlere Kraftstoffverbräuche für die gesamte bisherige Einsatzdauer der Fahrzeuge im jeweiligen Hafen zur Verfügung, die aus den Bordcomputern der Fahrzeuge ausgelesen wurden und ebenfalls in der Tabelle dargestellt sind.

In der Anfangsphase des Vorhabens wurden durch den Projektpartner Konecranes mittels eines physikalischen Fahrzeugmodells zusätzlich Kraftstoff- und Stromverbräuche der Terminal Trucks für verschiedene Zyklen berechnet, die jeweils einer typischen Situation an verschiedenen Einsatzorten entsprechen (siehe AP 3a des Abschlussberichts).

Es fällt auf, dass die im Feldversuch gemessenen Stromverbrauchswerte deutlich niedriger liegen als die zu Projektbeginn gemessenen Werte. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass bei den Vorab-Berechnungen sehr konservative Annahmen getroffen wurden, um die resultierenden Betriebszeiten des B-TT auf jeden Fall einhalten zu können. Im Feldtestbetrieb wurde dann festgestellt, dass faktisch deutlich seltener geladen werden musste. Im Falle einer Serienfertigung könnte voraussichtlich das Fahrzeuggewicht des B-TT reduziert werden, so dass für diesen Fall tendenziell ein noch geringerer Verbrauch zu erwarten ist. Alle folgenden Auswertungen basieren für den elektrischen Verbrauch auf den Messwerten des Feldtests. Für die Untersuchung der Übertragbarkeit auf andere Terminals werden die für diese Terminals modellierten Stromverbräuche anhand der Messwerte bei CTA/NTM skaliert, um eine Vergleichbarkeit der Terminals herzustellen.

Bezogen auf eine Betriebsstunde sind die gemessenen Stromverbräuche bei CTA und NTM vergleichbar. Bezogen auf den km ergibt sich jedoch ein deutlich höherer Verbrauch bei NTM. Dies dürfte an der niedrigeren mittleren Geschwindigkeit und den höheren Stillstandsanteilen bei NTM liegen. Auf diese Weise fällt der Nebenverbrauch hier bezogen auf den Kilometer stärker ins Gewicht. Auch fällt auf, dass die Varianz der Verbrauchswerte bei NTM höher ist als bei CTA. Dies deutet auf ein heterogeneres Einsatzprofil der Fahrzeuge bei NTM verglichen mit CTA hin.

Der höhere km-spezifische Verbrauch bei NTM dürfte auch damit zusammenhängen, dass innerhalb der einzelnen Zyklen bei NTM deutlich dynamischer gefahren wurde, wie eine Auswertung der relativen Beschleunigung (Relative positive acceleration, RPA) zeigt (Abbildung 3 rechts). Hierbei ist zu beachten, dass bei CTA die Geschwindigkeit der Trucks auf 30 km/h gedeckelt war, während sie bei NTM bis zu 40 km/h fahren konnten. Der resultierende höhere Verbrauch pro km lässt sich gut an der Darstellung des stündlichen Verbrauchs über die mittlere Geschwindigkeit erkennen (Abbildung 3 links).

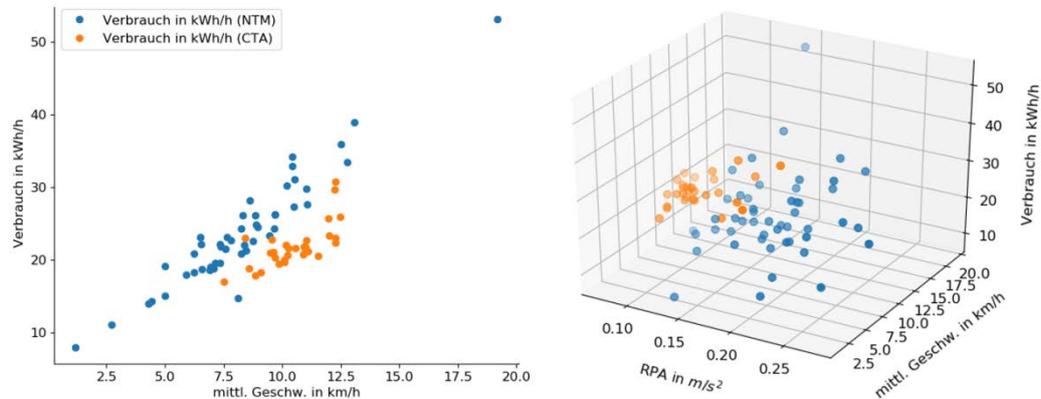


Abbildung 9: Vergleich der Fahrdynamik zwischen dem Betrieb bei NTM und CTA

Bei den Dieselverbräuchen ergibt sich bei CTA eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Modell, die geringfügige Abweichung der Messung nach unten könnte damit zusammenhängen, dass sich der Dieselmotor bei den im CTA eingesetzten Fahrzeugen nach einer Weile Leerlauf automatisch abschaltet, wohingegen dies im Modell nicht simuliert wurde., bei NTM hingegen ist der gemessene Verbrauch deutlich geringer als der berechnete Wert. Auch bezogen auf die Strecke ist der Dieselverbrauch bei NTM signifikant niedriger als bei CTA. Dies erscheint vor dem Hintergrund der gemessenen Stromverbräuche unplausibel.

Die Dieselverbräuche wurden aus den Bordcomputern der Fahrzeuge als Mittelwerte bezogen auf die bisherige Betriebsdauer der Fahrzeuge ausgelesen. Es ist allerdings nicht klar, welche Zeit hier als Betriebsdauer angesetzt wurde (insbesondere, ob während dieser Zeit der Dieselmotor immer eingeschaltet war). Es wird vermutet, dass auch längere Stillstandszeiten bei ausgeschaltetem Motor, aber eingeschalteter Zündung angerechnet wurden. Auf diese Weise würden sich die niedrigen Verbräuche erklären.

Aufgrund der genannten Unsicherheiten wird für die Umweltbewertung des Feldversuchs bei NTM der vorab berechnete Dieselverbrauch zugrunde gelegt. Da es im Fall von CTA nur eine geringe Abweichung von ausgelesenem und berechnetem Kraftstoffverbrauch gab, wird davon ausgegangen, dass die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs mittels des Modells von Projektpartner Konecranes richtungssicher ist.

Tabelle 4: Kraftstoffverbrauch der Referenzfahrzeuge

	Dieselverbrauch pro Betriebsstd. [Liter/h]		v_{mittel} [km/h]	Dieselverbrauch pro km [Liter/km]	
	Messung	Modell		Messung	Modell
CTA	9,07	9,4	10,4	0,872	0,904
NTM	5,36	7,2	7,5	0,714	0,96

Bezugsgröße für die Umweltbilanz

Terminal Trucks absolvieren ein Fahrprofil mit viel „Stop & Go“ und teilweise längeren Stillstandszeiten zwischen zwei Fahrten, während denen Aggregate wie das Hydraulik- und das Pneumatiksystem weiterlaufen. Der Energieverbrauch hängt somit nicht nur von den gefahrenen Kilometern, sondern auch von der Betriebsdauer ab. Um herauszufinden, ob Strecke oder Betriebsdauer ein besseres Maß für die Ermittlung des Verbrauchs darstellen, wurden diese beiden

Größen für die aufbereiteten Zyklen des Feldversuchs jeweils über dem Verbrauch abgetragen und eine lineare Regression durchgeführt (Abbildung 4 für CTA und 5 für NTM).

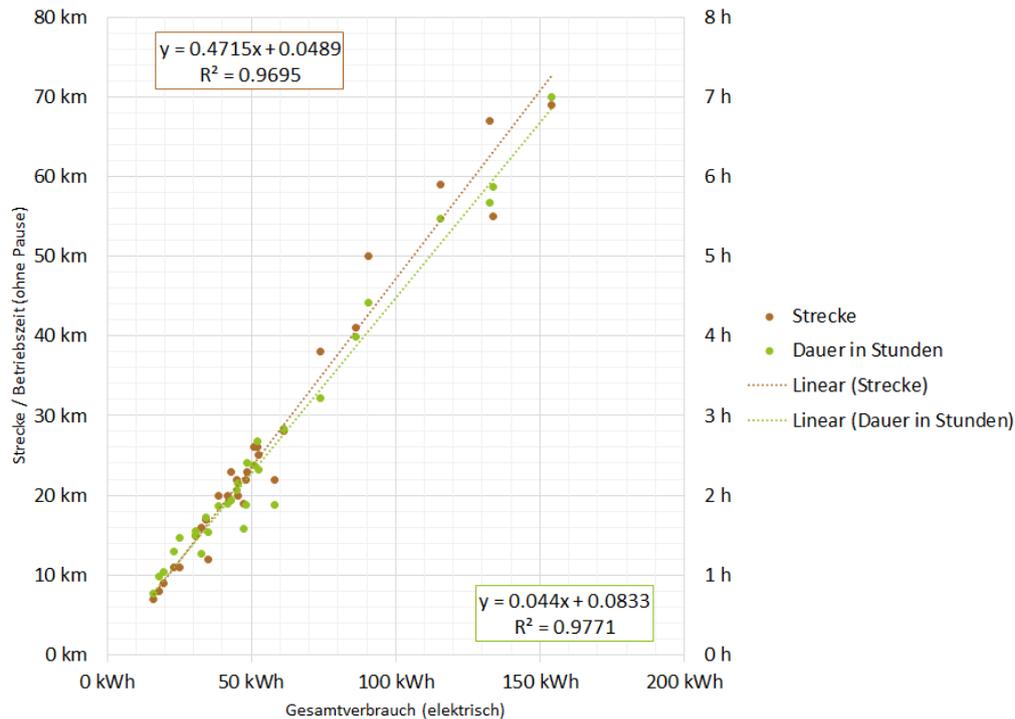


Abbildung 10: Abhängigkeit des Verbrauchs von Strecke und Betriebsdauer (CTA)

Für den Feldversuch bei CTA liegt das Bestimmtheitsmaß sowohl für die Betriebszeit als auch für die Strecke bei deutlich über 90 %. Dies deutet auf einen sehr regelmäßigen, gleichförmigen Betrieb mit sehr ähnlichen Durchschnittsgeschwindigkeiten zwischen den Zyklen hin. Bei NTM hingegen ist die Abhängigkeit des Verbrauchs von der Betriebsdauer weniger eindeutig (Bestimmtheitsmaß ca. 64 %), wohingegen die zurückgelegte Strecke ein besseres Maß darstellt. Dies liegt vermutlich daran, dass die Länge der Stillstandszeiten bei eingeschaltetem Fahrzeug (mit entsprechendem Nebenverbrauch) im Fall von NTM deutlich größer war und daher im Verhältnis auch stärker variierte. Zur Darstellung der Umweltwirkungen im Abschnitt „Umweltbedingungen unter den Bedingungen des Feldtests“ wird daher der Streckenbezug gewählt.

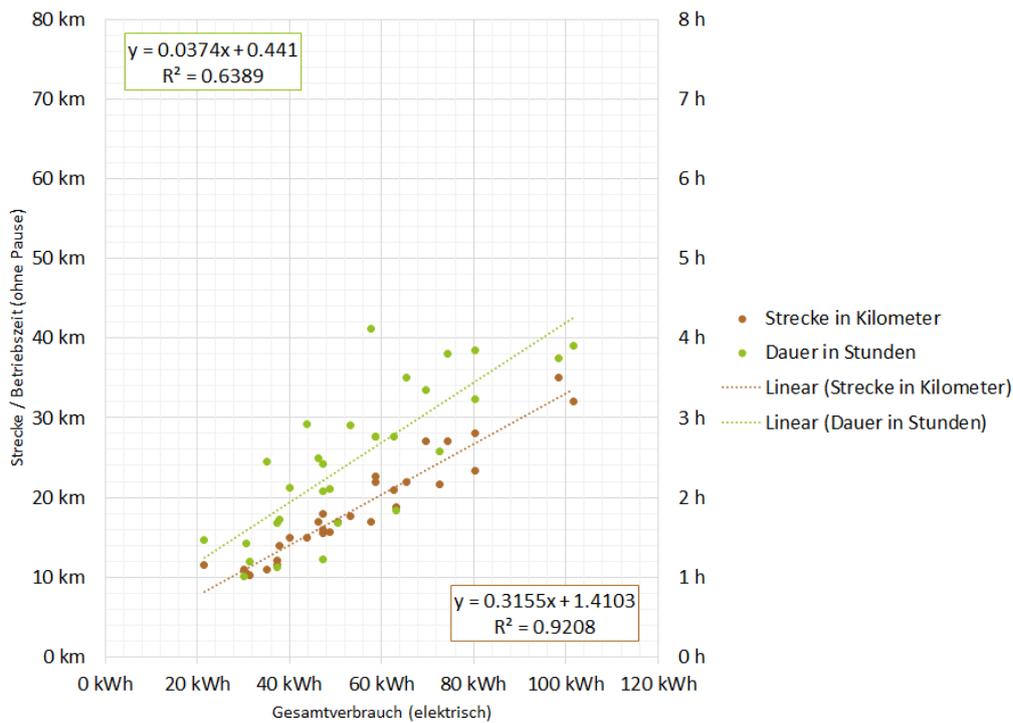


Abbildung 11: Abhängigkeit des Verbrauchs von Strecke und Betriebsdauer (NTM)

Witterungsabhängigkeit

Witterungsdaten konnten nur für die Aufzeichnungen während des Feldversuchs bei CTA Hamburg bezogen werden, da bei NTM keine Zeitstempel mitgeloggt wurden. Um den Einfluss der Außentemperatur auf den Nebenverbrauch bewerten zu können, wurden die Stundenwerte der Wetterstation Hamburg-Neuwiedenthal des DWD (Deutscher Wetterdienst) herangezogen und den bei CTA erhobenen Betriebsdaten zugeordnet. Das Temperaturfenster der Aufzeichnungen reicht von 2 °C im Winter bis 27 °C in den Sommeraufzeichnungen. Abbildung 1 zeigt, dass der Einfluss der Außentemperatur auf den Nebenverbrauch sehr gering ist, bei höheren Temperaturen kommt es zu einem nur sehr leichten Anstieg. Im Mittel lag die Leistungsaufnahme der Nebenaggregate bei 7,7 kW. Der Maximalwert beträgt 25,1 kW.

Die Bestimmung eines variablen Energieverbrauchs durch das Thermomanagement der Batterie aufgrund unterschiedlicher Umgebungsbedingungen ist aufgrund fehlender Messreihen nicht ohne weiteres möglich. Innerhalb des betrachteten Temperaturfensters von 2 °C bis 27 °C zeigt sich also kein signifikanter direkter Einfluss der Außentemperatur auf den Verbrauch oder die Eigenschaften der Traktionsbatterie.

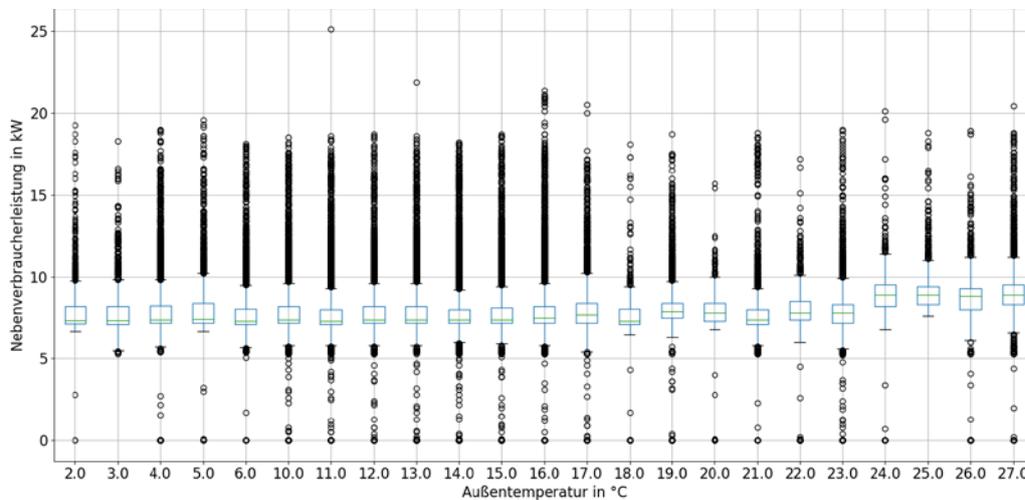


Abbildung 12: Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher in Abhängigkeit der Außentemperatur (Feldversuch CTA)

Zusammenfassung der Erkenntnisse aus dem Feldtest

Folgende für die Umweltbewertung wesentlichen Erkenntnisse ergaben sich aus dem Feldtest:

- Die Fahrprofile unterscheiden sich zwischen CTA und NTM deutlich (CTA: geringere Geschwindigkeiten, geringere Dynamik, höherer Fahranteil)
- Die Messungen während des Feldtests ergaben einen gegenüber der vorangegangenen Modellierung deutlich geringeren mittleren Stromverbrauch des B-TT. Dies betrifft vor allem das Einsatzprofil bei CTA.
- Der gemessene Nebenverbrauch des B-TT liegt mit ca. einem Drittel des mittleren Gesamtverbrauchs relativ hoch – hier werden für eine spätere Serienfertigung noch Einsparpotentiale gesehen. Es konnte keine signifikante Abhängigkeit des Nebenverbrauchs von der Außentemperatur festgestellt werden.
- Innerhalb eines Terminals ist der kilometerspezifische Verbrauch für die dort gefahrenen Zyklen sehr stabil. Der Verbrauch pro Betriebsstunde kann hingegen (insbesondere aufgrund wechselnder Fahranteile) innerhalb eines gewissen Bereichs schwanken. Als Bezugsgröße für den nachfolgenden Umweltvergleich der Antriebe wird daher ein gefahrener Kilometer gewählt.

Umweltbilanz unter den Bedingungen des Feldtests

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Umweltwirkungen des batteriebetriebenen Terminal Trucks mit denen der dieselbetriebenen Referenzfahrzeuge verglichen. Dies erfolgt jeweils separat für die Feldversuche bei Neuss-Trimodal (NTM) sowie im Containerterminal Altenwerder (CTA), da die Einsatzprofile hier relevante Unterschiede aufweisen. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass eine detaillierte Erfassung der Verbrauchsdaten der Diesel-Referenzfahrzeuge für den Zeitraum des Feldtests nicht Teil des Projekts war und hier zum Teil auf modellierte Werte zurückgegriffen werden musste (siehe auch Abschnitt „Fahrprofil und Verbrauch“). Auch hinsichtlich der Fahrzeugwartung gibt es Unsicherheiten, da im Rahmen des Projekts die Wartungsaufwände nicht über einen längeren Betriebszeitraum erhoben werden konnten. Trotz dieser Unsicherheiten lässt sich insgesamt ein aussagekräftiger Vergleich der Antriebe durchführen.

Die Auswahl der untersuchten Wirkungskategorien orientiert sich einerseits an der Zielsetzung des Projekts (Treibhausgasminderung, Energieeffizienz → Klimawirkung und Kumulierter Energieaufwand als betrachtete Wirkungskategorien), zum zweiten an bekannten „Schwachstellen“ elektrischer Antriebe (→ Versauerungspotential) und zum dritten an typischen Umweltproblemen in dicht besiedelten Gebieten, zu denen häufig auch Hafenstandorte gehören (→ Feinstaubemissionen, Stickoxidemissionen).

Treibhausgasemissionen

Bei den Treibhausgasemissionen (Abbildung 7) entfällt unabhängig vom Antrieb der weit überwiegende Teil auf die Betriebsphase der Fahrzeuge (Bereitstellung und Verbrennung des Dieselmotors sowie Erzeugung des Antriebsstroms) – Fahrzeug- und Batterieherstellung sowie Wartungsaufwände spielen eine untergeordnete Rolle. Grund dafür ist vor allem die hohe Auslastung der Fahrzeuge, die in mehreren Schichten pro Tag betrieben werden. Außerdem wurde bei der Fahrzeugherstellung nur die Zugmaschine bilanziert, nicht aber der Trailer.

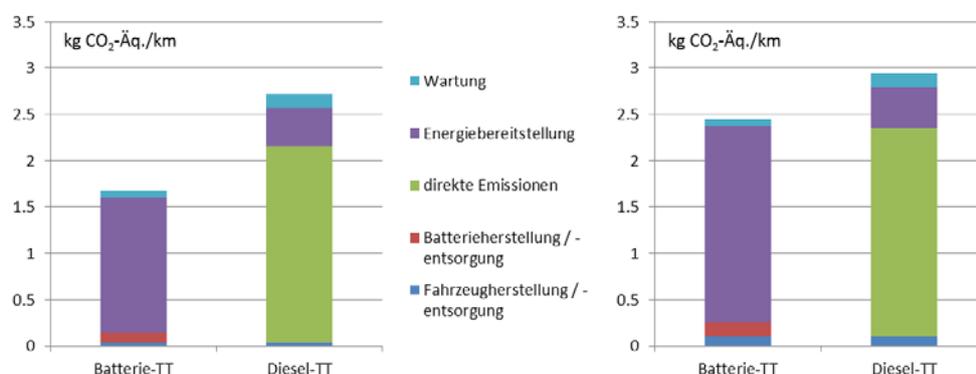


Abbildung 13: Treibhausgasemissionen im Feldtest (links CTA, rechts NTM) bei deutschem Strommix 2014

Bei beiden Feldversuchen konnte durch den B-TT eine deutliche Minderung der THG-Emissionen pro Kilometer erzielt werden. Bei CTA sinken die THG-Emissionen über den Lebensweg um 38 %, bei NTM immerhin um 17 % (jeweils unter

Annahme des deutschen Strommixes des Jahres 2014 mit einem spezifischen CO₂-Äquivalent von 612 g/kWh inkl. Rohstoffvorketten und Netzverlusten). Die stärkere Minderung bei CTA hängt mit dem dortigen Betriebsprofil zusammen: Der Fahranteil war bei CTA höher, gleichzeitig waren die gefahrenen Geschwindigkeiten geringer. Es ist daher davon auszugehen, dass sich die Dieselfahrzeuge bei CTA häufig in einem relativ ineffizienten Teillastbetrieb befinden und der Elektroantrieb daher seine Stärke eines konstant hohen Wirkungsgrades besonders gut ausspielen konnte.

Versauerungspotential

Das Versauerungspotential ist ebenfalls stark durch den Betrieb bestimmt, allerdings liefert hier auch die Batterieherstellung einen relevanten Beitrag. Dieser geht vor allem auf die Extraktion der für die Herstellung der Batteriezellen notwendigen Rohstoffe zurück und kann durch Recycling der Batteriezellen mit Kreislaufführung insbesondere der Rohstoffe Nickel und Kobalt deutlich gesenkt werden (vgl. ifeu 2016). Beim Betrieb der Dieselfahrzeuge sind vor allem die NO_x-Emissionen für die Versauerung relevant, bei der Raffination des Dieselmotorkraftstoffs tragen zudem SO₂-Emissionen zur Versauerung bei.

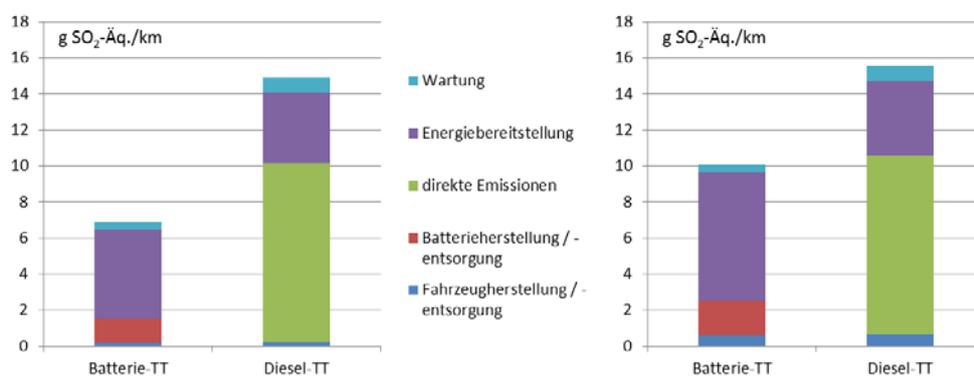


Abbildung 14: Versauerungspotential im Feldtest (links CTA, rechts NTM)

Insgesamt ergibt sich eine deutliche Reduktion des Versauerungspotentials durch den B-TT gegenüber den Referenzfahrzeugen um 54 % bei CTA und 35 % bei NTM. Bei beiden Antrieben besteht prinzipiell Reduktionspotential der zur Versauerung beitragenden Emissionen. Für den Dieselantrieb ist beim betrachteten Zyklus (Stop and Go) laut HBEFA 3.3 allerdings erst ab Eurostufe VI mit einer signifikanten Minderung der NO_x-Emissionen zu rechnen. Aufseiten des B-TT kommt es in erster Linie auf die Entwicklung des Strommixes (Anteil der Kohlefeuerung) an.

Feinstaubemissionen

Bei den Feinstaubemissionen ergibt sich im Vergleich der Antriebe kein einheitliches Bild: Die Emissionen durch die Energiebereitstellung liegen in der gleichen Größenordnung bei Strom- und Dieselfahrzeugen. Beim B-TT entstehen keine verbrennungsmotorischen Feinstaubemissionen im Betrieb, dafür aber zusätzliche Emissionen durch die Herstellung der Batterie. Abriebs- und Aufwirbelungsemissionen sind bei beiden Konzepten näherungsweise gleich und werden hier daher nicht ausgewiesen. Die Emissionen für die Fahrzeugwartung basieren mangels differenzierter Datengrundlage und Erfahrungswerten auf sehr groben Abschätzungen und sollten zukünftig näher untersucht werden.

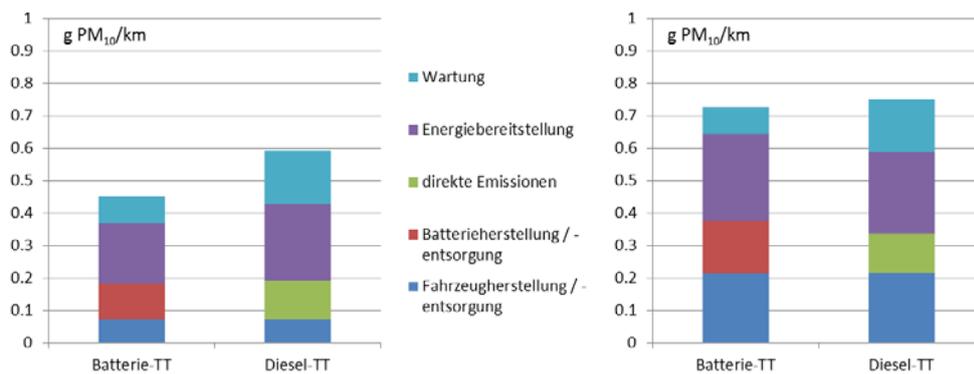


Abbildung 15: Feinstaubemissionen im Feldtest (links CTA, rechts NTM)

Überdies hängt die gesundheitliche Relevanz der Partikelemissionen stark von der Partikelgröße und der Bevölkerungsexposition ab, wobei letztere wiederum vom Emissionsort abhängt. Diese Faktoren können im Rahmen der hier durchgeführten Umweltbewertung nicht im Detail untersucht werden, sind aber für eine abschließende Bewertung des daraus entstehenden gesundheitlichen Risikos entscheidend.

Sicher ist, dass lokale Partikelemissionen am Betriebsort durch B-TT deutlich reduziert werden können. Dies kommt insbesondere Hafenstandorten in dicht besiedelten Gebieten zugute.

Stickoxidemissionen

Die NO_x-Emissionen resultieren größtenteils aus dem Betrieb des Dieselmotors und lassen sich daher durch Elektrifizierung der Fahrzeuge dramatisch reduzieren (um etwa 90 % bei CTA bzw. 85 % bei NTM). Dies stellt einen wesentlichen Vorteil des elektrischen Antriebs dar, von dem vor allem die Gesundheit der Hafearbeiter sowie die der Bevölkerung in angrenzenden Wohngebieten profitiert.

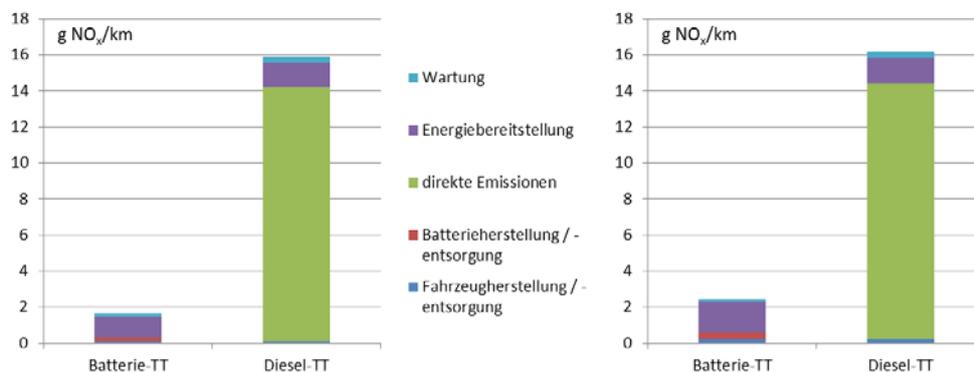


Abbildung 16: Stickoxid-Emissionen im Feldtest (links CTA, rechts NTM)

Der hohe spezifische NO_x-Emissionsfaktor der Dieselfahrzeuge geht v.a. auf den Stop-and-Go-Betrieb zurück. Es ist zu berücksichtigen, dass der gewählte Zyklus des HBEFA 3.3 (URB/Access/30/St+Go) sicher nur eine grobe Annäherung an das reale Betriebsprofil der Terminal Trucks darstellt und es nicht auszuschließen ist, dass die Abgasreinigungstechnik der Fahrzeuge auf sehr dynamischen Betrieb bei niedrigen Geschwindigkeiten optimiert wurde, um die Emissionen zu senken. Dies wäre allerdings nur durch Emissionsmessungen an den Fahrzeugen im Realbetrieb zu ermitteln gewesen, die im Projekt nicht vorgesehen waren.

Durch Einsatz weiterentwickelter Abgasreinigung könnten die NO_x-Emissionen voraussichtlich reduziert werden (siehe Abschnitt „Versauerungspotential“). Allerdings steigen damit auch die Kosten.

Kumulierter Energieaufwand

Der Vergleich des (nicht-erneuerbaren) kumulierten Energieaufwands (KEA) spiegelt quantitativ in etwa die Situation bei den THG-Emissionen wider: Bei CTA sinkt der KEA mit B-TT um 37 %, bei NTM um 15 %. Der Grund liegt zum einen darin, dass die Elektrifizierung eine Erhöhung der Energieeffizienz über die gesamte Kette bewirkt. Die

Wirkungsgradvorteile des elektrischen Antriebs zeigen dabei eine deutliche Abhängigkeit vom Einsatzprofil: Bei CTA (geringere Geschwindigkeiten und Dynamik, deshalb häufige Teillast) waren sie offenbar größer als bei NTM.

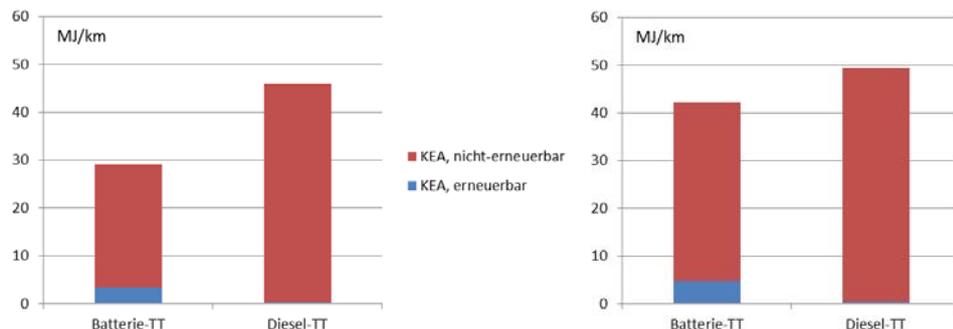


Abbildung 17: Kumulierter Energieaufwand (differenziert nach erneuerbar und nicht-erneuerbar) im Feldtest (links CTA, rechts NTM)

Zum anderen wird es durch die Elektrifizierung möglich, erneuerbare Energie im Strommix zu nutzen. Der Anteil erneuerbaren KEAs kann durch Bezug zusätzlichen erneuerbaren Stroms für den B-TT-Betrieb weiter ausgebaut werden.

Wichtige Einflussgrößen und Übertragbarkeit der Umweltbilanz

Für den Basisfall wird in diesem Abschnitt jeweils der Mittelwert aus der Situation bei CTA und NTM verwendet.

Strombereitstellung

Für den Durchschnitt der Feldversuche bei CTA und NTM wird für deutschen Strommix des Jahres 2014 durch den B-TT eine THG-Minderung von ca. 29 % gegenüber einem Diesel-TT erzielt. In Abbildung 13 ist dargestellt, wie sich das für andere Varianten der Strombereitstellung darstellt. Während die Minderung bei britischem Strommix (z.B. Standort Felixstowe) etwas geringer ausfällt, sinken die THG-Emissionen für den Fall spanischer Stromversorgung (mit einem höheren Anteil erneuerbarer Energie und weniger Kohlekraft) gegenüber Deutschland um fast 40 %. Im Mittel des UCTE-Netzes ergeben sich ca. 20 % geringere Emissionen gegenüber einem Betrieb in Deutschland und insgesamt knapp 50 % Minderung gegenüber dem Diesel-TT. In Abschnitt 3.3.3 wird ein exemplarischer Vergleich von Hafenstandorten in den drei genannten Ländern unter Berücksichtigung weiterer Parameter durchgeführt.

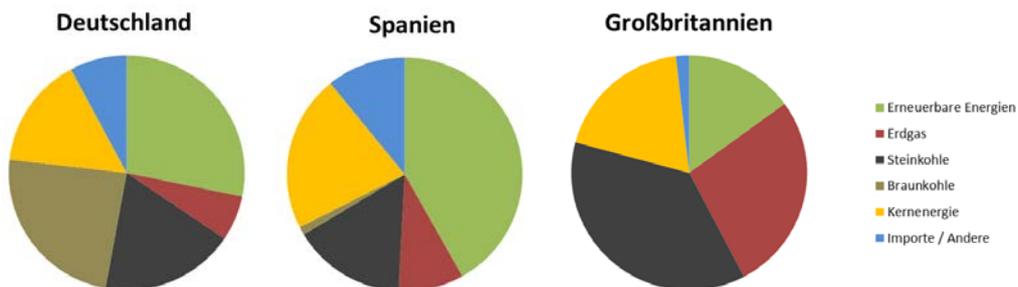


Abbildung 18: Zusammensetzung der Strombereitstellung nach Kraftwerksarten in den Ländern der für den Standortvergleich herangezogenen Terminalstandorte (Deutschland und Spanien auf Grundlage von EcoInvent 3.4, Großbritannien auf Basis von EcoTransit World (https://www.ecotransit.org/download/EcoTransIT_World_Methodology_Data_Update_2018.pdf S. 96 ff))

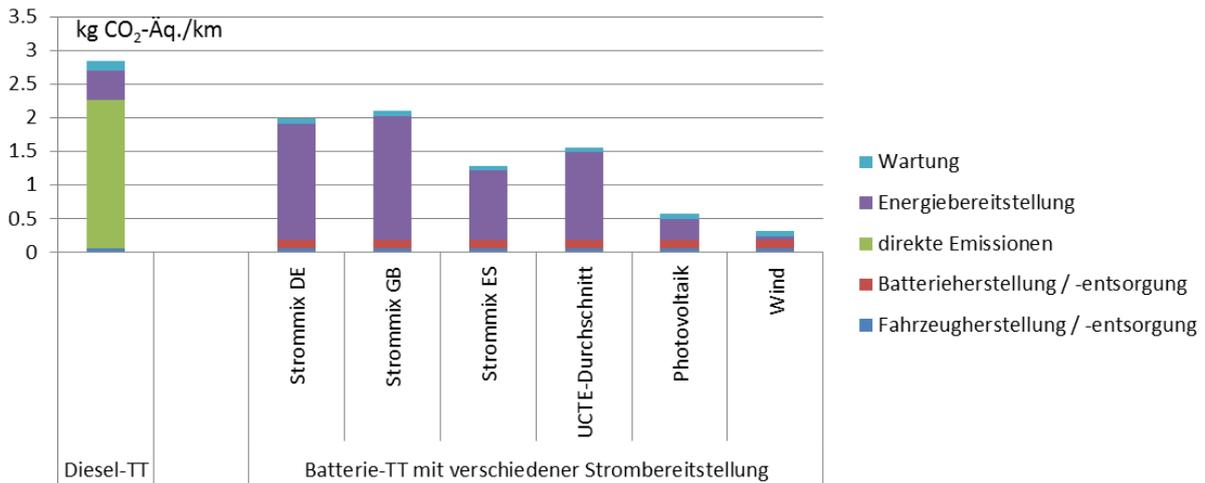


Abbildung 19: Treibhausgasemissionen des Batterie-Terminal-Trucks für verschiedene Arten der Strombereitstellung im Vergleich zum Diesel-Terminal-Truck

Bei Betrieb der B-TT mit zusätzlicher erneuerbarer Energie können die THG-Emissionen der TT-Flotte über den gesamten Lebensweg um mehr als 80 % gesenkt werden, wobei Windenergie hier aufgrund des anteilig geringeren Infrastrukturaufwands einen Vorteil gegenüber Photovoltaik hat. Entscheidend bei der Bilanzierung mit erneuerbarem Strom ist die Zusätzlichkeit: Der Strom kann nur dann als erneuerbar angerechnet werden, wenn eine kausale Beziehung zwischen dem Betrieb der B-TT und dem Aufbau der EE-Erzeugungsanlagen besteht. Dies sollte sich in der Regel durch eine entsprechende Kostenbeteiligung zeigen.

Klimatische Bedingungen

Die vorherrschenden klimatischen Bedingungen wirken sie sich auf die Lebensdauer der Traktionsbatterie aus, insofern sich die Betriebstemperatur der Batterie in Abhängigkeit der Außentemperatur ändert. Sowohl die zyklische als auch die kalendarische Lebensdauer der Batterien hängen stark von der Betriebstemperatur ab:

- Bei $T=25^{\circ}\text{C}$ oder niedriger kann lt. Herstellerangaben eine Lebensdauer etwa 20 Jahren (ohne Zyklisierung) bzw. von 4000 Zyklen erreicht werden.
- Oberhalb einer Temperatur von 25°C sinkt die Lebensdauer der Batterie stark ab, auf nur noch etwa 1200 Zyklen bei 40°C

Leider konnten die Temperaturen in den Batterietrögen während des Feldtests aufgrund von Fehlern der Messausrüstung nicht ermittelt werden. Es ist somit unklar, in welchem Maße die Temperatur der Batterien von der Umgebungstemperatur abgewichen sind und ob sich daraus Implikationen für die Batterielebensdauer ergeben. Im Berichtsteil der Firma REFU wird ausgeführt, dass bei sommerlichem Testbetrieb im NTM-Terminal ohne weitere Schutzmaßnahmen bereits bei Stillstand des Trucks Temperaturen von über 40°C erreicht wurden.

Bei den bisherigen Auswertungen wurde davon ausgegangen, dass die Batterietemperatur nicht wesentlich von der Außentemperatur abgewichen ist, obwohl keine aktive Kühlung des Batteriesystems eingesetzt wurde. Um angesichts der genannten Unsicherheiten den Einfluss dieser Annahme zu ermitteln, werden im Folgenden zwei weitere Fälle betrachtet:

- Es ist eine aktive Klimatisierung notwendig, um die Batterietemperatur konstant auf etwa 25°C zu halten und vor allem Temperaturspitzen zu vermeiden. Diese geht mit einem zusätzlichen elektrischen Nebenverbrauch einher, der auf Grundlage der im Bericht des Projektpartners REFU beschriebenen Dimensionierung des Kühlaggregats (1000 W Kompressorleistung für die komplette Batterie) mit $4,4 \text{ W/kWh}$ Batteriekapazität abgeschätzt wurde (Fall b) in Abbildung 14).
- Es ist keine aktive Klimatisierung vorhanden und die Batterietemperatur steigt infolgedessen auf 40°C . Dadurch ist die Alterung stark beschleunigt und es müssen in der Bilanz vorzeitige Batteriewechsel berücksichtigt werden (Fall c) in Abbildung 14).

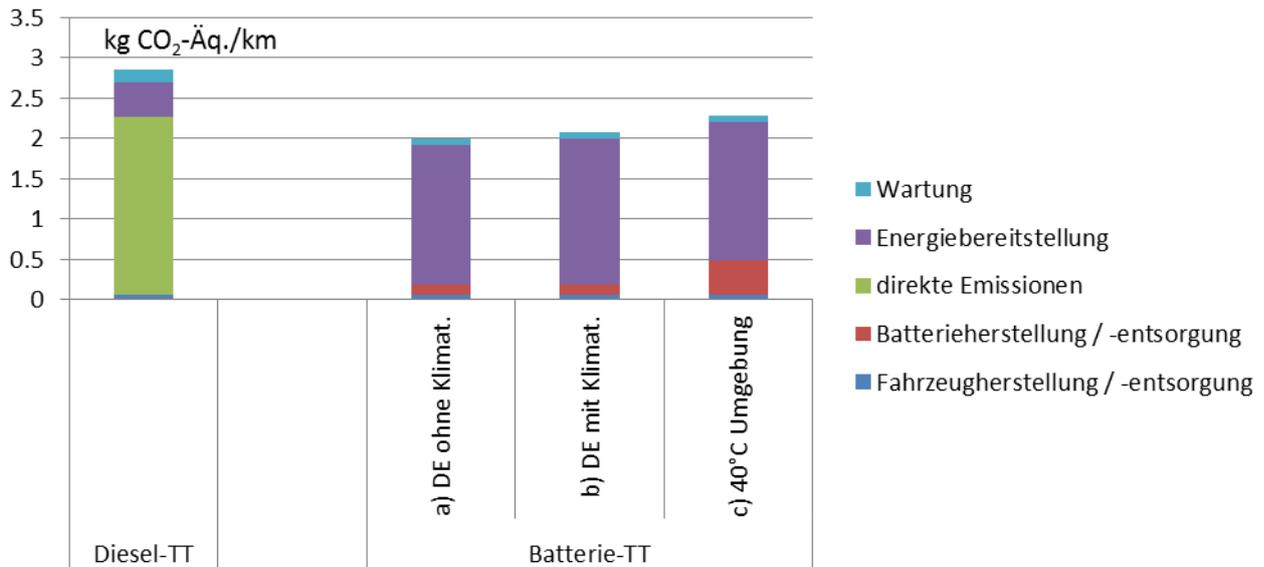


Abbildung 20: Treibhausgasemissionen des Batterie-Terminal-Trucks a) ohne Batterieklimatisierung unter der Annahme, dass die der Außentemperatur ist (deutsches Klima), b) mit Batterieklimatisierung sowie c) ohne Batt.klimatisierung unter der Annahme e Batterietemperatur von konstant 40 °C

Im Fall der Klimatisierung (Fall b) steigen die THG-Emissionen um ca. 4 %, im Fall der temperaturbedingt beschleunigten Batteriealterung um etwa 15 %, wie Abbildung 14 zeigt. Dies reduziert also den THG-Vorteil durch die Elektrifizierung, kompensiert ihn aber nicht vollständig. Zudem ist zu berücksichtigen, dass Fall c über das Jahr gerechnet eine Extremannahme darstellt. Der reale Leistungsbedarf einer Batterieklimatisierung ist ohne entsprechende Messreihen schwer abzuschätzen und hängt auch stark vom Design des Fahrzeugs und der Batterieträge ab. Die hier zugrunde gelegte Auslegung des Kühlsystems ist markiert eher das untere Ende der zu erwartenden Nennleistung, andererseits ist auch unklar, über welchen Anteil des Betriebszeitraums das Kühlsystem mit welcher Leistung arbeiten müsste. Bei Betrachtung des Betriebs in deutlich wärmeren Regionen (z.B. Terminal in Algeciras/Spanien) sollte der Einfluss auf die Batterietemperatur und -alterung jedenfalls sorgfältig untersucht werden. Zudem sollten Daten erhoben werden, wie stark sich die Batterie durch die internen Verlustenergien selber aufheizt.

Zusätzlich zu den oben diskutierten Effekten auf das Batteriesystem beeinflusst die Außentemperatur im Allgemeinen auch den sonstigen Nebenverbrauch der Fahrzeuge (v.a. für die Klimatisierung bzw. Heizung der Kabine sowie ggf. weiterer technischer Komponenten). Wie in Abschnitt „Witterungsabhängigkeit“ dargelegt, konnte allerdings kein signifikanter Einfluss der Außentemperatur auf den Nebenverbrauch festgestellt werden. Mögliche Gründe dafür sind die Heizung des Versuchsfahrzeugs per Diesel-Standheizung (daher kein Nebenverbrauch durch Heizung) sowie das ohnehin mit etwa 7,5 kW recht hohe Niveau der Nebenverbrauchsleistung (das sich für künftige Serienfahrzeuge voraussichtlich reduzieren lässt).

Bilanz an anderen Terminal-Standorten

Abschließend werden die beiden Feldtest-Terminals mit Standorten außerhalb Deutschlands verglichen, um Aussagen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse treffen zu können. Für den Vergleich werden die Terminals in Algeciras (Spanien) sowie Felixstowe (Großbritannien) herangezogen. Für diese wurden vom Projektpartner Konecranes typische Betriebszyklen ermittelt und Energieverbräuche für Diesel- und Batterieantrieb berechnet, die hier erneut zur Anwendung kommen. Für den Vergleich wurden die berechneten Kraftstoffverbräuche am Messwert von CTA sowie die berechneten Stromverbräuche an den mittleren Messwerten aus den Feldversuchen bei CTA und NTM normiert. So ist auch eine Vergleichbarkeit mit den vorangegangenen Auswertungen gegeben. Des Weiteren werden für den Vergleich die jeweiligen Klimaprofile sowie die Struktur der Stromerzeugung im jeweiligen Land zugrunde gelegt (siehe Abbildung 12).

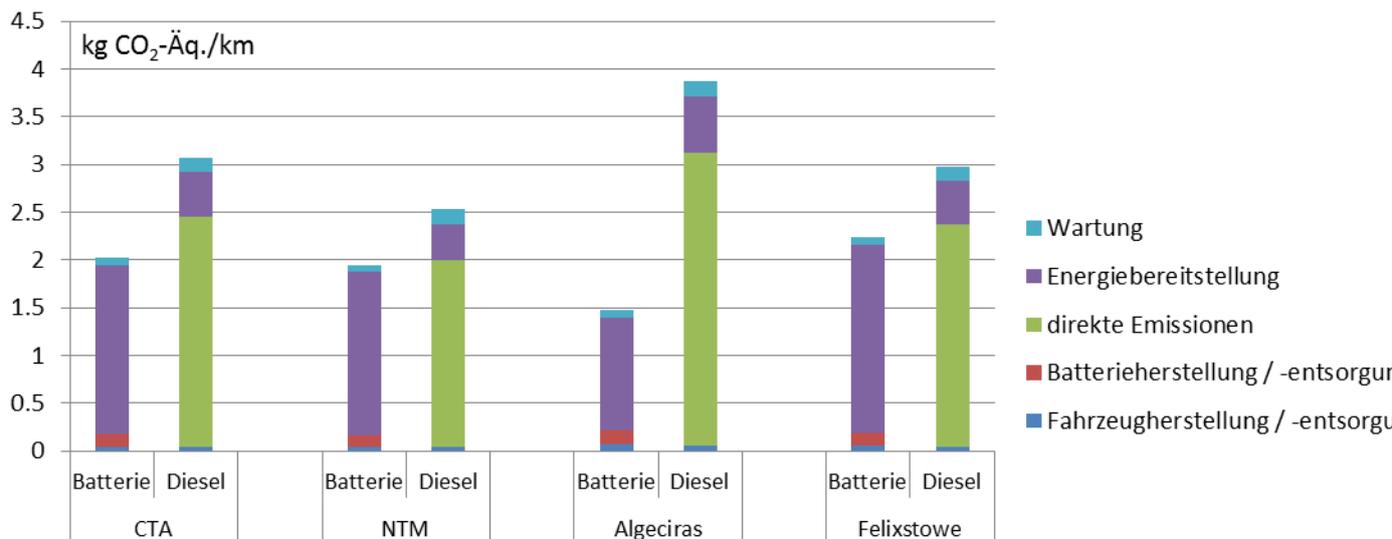


Abbildung 21: Treibhausgasemissionen von B-TT und dieselbetriebenem Referenzfahrzeug für verschiedene Terminalstandorte

Der Vergleich der Treibhausgasemissionen fällt je nach Standort durchaus unterschiedlich aus (Abbildung 15). Bei Algeciras zeigt sich ein sehr hohes THG-Minderungspotential von etwa 60 %, während es im Fall von Felixstowe nur etwa 25 % sind. Hier wirken sich vor allem die unterschiedlichen Strommixe sowie die spezifischen Verbräuche aus. Die Temperatur spielt hingegen kaum eine Rolle, da hier wie schon zuvor davon ausgegangen wird, dass die Batterie vor längerer direkter Sonneneinstrahlung geschützt ist und daher im Wesentlichen mit Umgebungstemperatur arbeitet. Eine deutlich erhöhte Betriebstemperatur bzw. Notwendigkeit einer aktiven Kühlung würde die Emissionen in der Größenordnung von 15-20 % erhöhen (siehe Abschnitt „Klimatische Bedingungen“).

Bei den Stickoxidemissionen zeigt sich bei allen betrachteten Standorten ein großer Vorteil des B-TT gegenüber dem dieselbetriebenen Fahrzeug. Allerdings gibt es hier aufseiten der Strombereitstellung durchaus Unterschiede zwischen den Länderstrommixen. In Spanien sind die in Ecolnvent 3.4 hinterlegten spezifischen NO_x-Emissionen für die Kohleverbrennung um etwa den Faktor 6 höher, so dass sich hier trotz eines höheren EE-Anteils auch insgesamt ein deutlich höherer spezifischer NO_x-Emissionsfaktor pro kWh ergibt. In Großbritannien spielen ähnliche Effekte eine Rolle. Allerdings ist davon auszugehen, dass die Exposition bei Kraftwerksemissionen eher geringer ist als bei Auspuffemissionen auf dem Betriebsgelände eines Hafens.

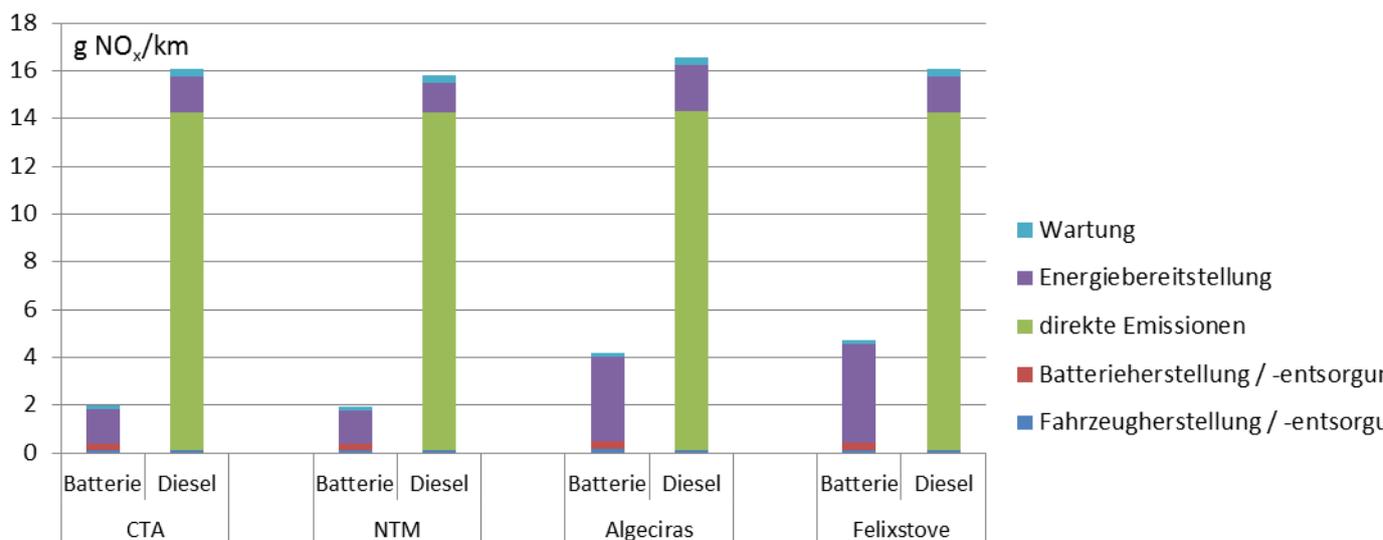


Abbildung 22: Stickoxidemissionen von B-TT und dieselbetriebenem Referenzfahrzeug für verschiedene Terminalstandorte

Insgesamt zeigt der Standortvergleich erwartungsgemäß einen großen Einfluss der Strombereitstellung sowie des relativen Verbrauchs von Strom und Diesel (siehe Tabelle 6). Es zeigt sich allerdings in allen betrachteten Fällen ein spürbarer Vorteil des B-TT bei den THG-Emissionen sowie Minderungen von über 60 % bei den NOx-Emissionen. Die Terminalbetreiber haben es zudem in der Hand, mittels der Installation zusätzlicher erneuerbarer Stromerzeugung für die TT-Flotte die Umweltbilanz weiter zu verbessern. Die Fahrzeugherstellung spielt dagegen eine relativ geringe Rolle, so dass auch bei einer gegenüber den Annahmen geringeren Lebensdauer der Batterie (im Rahmen des Erwartbaren) keine Verschlechterung der Umweltbilanz durch den Einsatz von B-TT zu befürchten ist.

Zusammenfassung

Die ökologische Bewertung des B-TT-Betriebs an den beiden Feldteststandorten Neuss-Trimodal (NTM) und Containerterminal Altenwerder (CTA) zeigte deutliche Vorteile des batterieelektrischen Antriebs gegenüber dem herkömmlichen Dieselantrieb. Die Treibhausgasemissionen (unter Berücksichtigung des gesamten Fahrzeuglebenswegs) konnten um 38 % (CTA) bzw. 17 % (NTM) gesenkt werden, der kumulierte Energieaufwand etwa im gleichen Maße. Beim Versauerungspotential lagen die Einsparungen etwas höher, die Stickoxidemissionen können gar um etwa eine Größenordnung durch den Einsatz von B-TT gesenkt werden, wodurch ein spürbarer Beitrag zur Luftqualität im Hafengebiete geleistet werden kann. Unsicherheiten bestehen bei den Partikelemissionen: Trotz lokaler Emissionsreduktion am Betriebsort besteht hier bei der Gesamtbilanz keine eindeutige Tendenz. Hier sollten für eine abschließende Bewertung genauere Untersuchungen durchgeführt werden.

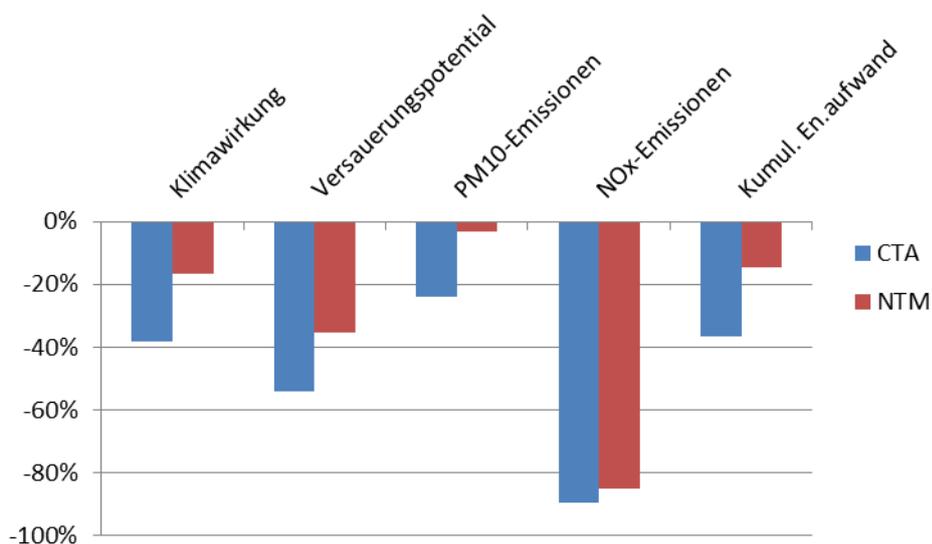


Abbildung 23: Umweltwirkungen und Energieaufwand des Batterie-TT relativ zum Diesel-TT für die beiden Feldteststandorte

Entscheidend für die ökologische Vorteilhaftigkeit des Batterieantriebs sind zum einen der zum Betrieb verwendete Strommix und zum anderen das Betriebsprofil. Wird der durchschnittliche Strommix des entsprechenden Landes herangezogen, so stellen Hafenstandorte in Spanien beispielsweise gegenüber Standorten in Großbritannien oder Deutschland aus Klimasicht wirkungsvollere Einsatzfelder für den B-TT dar. Übernimmt der Hafenbetreiber Verantwortung für seine Stromversorgung und beteiligt sich am Ausbau erneuerbarer Energien für seine TT-Flotte, so bestehen unabhängig vom Standort große CO₂-Minderungspotentiale durch Einsatz von B-TT.

Hinsichtlich des Betriebsprofils kann der elektrische Antrieb seine Stärken vor allem dann ausspielen, wenn häufig in Teillast gefahren wird. Im Feldtest war dies vor allem bei CTA der Fall. Hinsichtlich Gewicht (und damit auch Energieverbrauch) werden vom Projektpartner Konecranes für zukünftige B-TT-Serienfahrzeuge gegenüber dem Prototypen noch einige Reduktionspotentiale gesehen. Auch durch Weiterentwicklung der Batterietechnik ist künftig mit einer Verringerung des Fahrzeuggewichts zu rechnen. Möglich wäre zudem, kleinere Batterien mit hohen Laderaten einzusetzen, die durch häufige, aber kurze Ladepausen wieder aufgeladen werden. Für einige Terminals mit längeren, festen Streckenabschnitten könnte auch eine Energiezuführung via Oberleitung interessant sein – dadurch könnte die benötigte Batteriekapazität weiter reduziert werden.

Die Fahrzeug- und Batterieherstellung spielt in der Bilanz bei Terminal Trucks eine weit geringere Rolle als bspw. bei Pkw. Solange die Betriebsparameter der Batterie (v.a. die Temperatur) im vorgesehenen Bereich bleiben und die vom Hersteller kommunizierte Lebensdauer erreicht wird, hat die Batterie bei den Treibhausgasemissionen einen Anteil von deutlich unter 10 % an der Gesamtbilanz.

Um das Umweltentlastungspotential von Terminal Trucks (und anderen Hafenfahrzeugen) zukünftig noch genauer bestimmen zu können, sollten Versuchsfahrzeuge über einen längeren Zeitraum im Probetrieb bei Erfassung aller wesentlichen Betriebsdaten getestet werden. Dies könnte Aufschluss über den realen Wartungsaufwand sowie die Alterung der Traktionsbatterien unter Realbedingungen geben. Wichtig wäre zudem eine parallele Datenerfassung bei den konventionellen Vergleichsfahrzeugen.

Literatur

Bauer, Christian. (2010). Ökobilanz von Lithium-Ionen Batterien: Analyse Der Herstellung von Energiespeichern Für Den Einsatz in Batteriefahrzeugen. Villingen: Eine Studie im Auftrag der Volkswagen AG. Paul Scherrer Institut, Labor für Energiesystem-Analysen (LEA).

Gaines, Linda, Jennifer Dunn. (2012). Comparison of Li-Ion Battery Recycling Processes by Life-Cycle Analysis. Baltimore: Argonne National Laboratory.

Hawkins, Troy R., Bhawna Singh, Guillaume Majeau-Bettez, and Anders Hammer Strømman. (2013). Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology* 17(1):53–64. Retrieved August 14, 2013 (<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>).

ifeu (2016). Weiterentwicklung Und Vertiefte Analyse Der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Dessau-Roßlau: Hinrich Helms, Julius Jöhrens, Claudia Kämper, Jürgen Giegrich, Axel Liebich, Regine Vogt, Udo Lambrecht. ifeu- Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu). Umweltbundesamt. UBA Texte. Retrieved April 5, 2016 (<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/weiterentwicklung-vertiefte-analyse-der>).

Majeau-Bettez, Guillaume, Troy R. Hawkins, and Anders Hammer Strømman. (2011). Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-in Hybrid and Battery Electric Vehicles. *Environmental science & technology* 45(10):4548–54. Retrieved (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21506538>).

Notter, Dominic a et al. (2010). Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles. *Environmental science & technology* 44(17):6550–56. Retrieved (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20695466>).

Öko-Institut (2011). Ökobilanz Zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (Projekt LithoRec). Freiburg: M. Buchert, W. Jenseit, C. Merz, D. Schüler. Öko-Institut.

4. Vergleich der Projektergebnisse zum internationalen Stand der Technik

Im internationalen Vergleich gibt es mehrere Hersteller, die gleichzeitig zum bearbeiteten Projekt elektrische Terminalzugmaschinen entwickelt haben. Ein großflächiger Durchbruch ist jedoch noch nicht zu erkennen. Es ist zu vermuten, dass die Investitionskosten noch kein marktreifes Produkt ergeben. Technisch werden häufig vorhandene Diesel-Terminalzugmaschinen auf elektrischen Antrieb umgebaut, eine konsequente Neuentwicklung mit Ausschöpfung aller technischen und kostenrelevanten Mittel ist nicht zu erkennen. Der hier untersuchte BTT Prototyp weist nach unserer Auffassung in die richtige Richtung. Der BTT Prototyp verfügt über die optimale Antriebskonfiguration, die im Wesentlichen durch Skalierung der Batteriekapazität und durch Integration in ein kostengünstiges Basisfahrzeug marktfähig gemacht werden soll.

Konecranes verfügt über ein langjähriges Wissen in der Elektrifizierung von Schwerlasttransportfahrzeugen. Zuerst wurden die AGVs erfolgreich mit Blei-Batterien ausgerüstet und werden so in 4 großen Seehafenterminals eingesetzt. Dem Nachteil der Bleibatterie – hohes Gewicht, lange Ladezeit und im Vergleich zu Li-Ion-Batterien kürzerer Lebensdauer – wird in jüngster Zeit durch den Einsatz der aus dem BTT bekannten Li-Ion-Batterien begegnet. Die im Wechselspiel zwischen den beiden Fahrzeugen gewonnenen Erkenntnisse fließen direkt in die weitere Entwicklung der Batterietechnologie ein.

5. Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)

In den Seehäfen besteht ein deutlicher Wunsch zu einem Umweltneutralen Einsatz des erforderlichen Maschinenparks. Während viele Geräte bereits voll-elektrisch betrieben werden können, ist bei den Terminalzugmaschinen noch ausschließlich die diesel-motorische Antriebstechnik vorhanden. Häufig sind die Seehäfen jedoch nicht weit von Wohnbebauung entfernt, die Anwohner wünschen zu Recht eine Verminderung von Schadstoffen in der Luft und zusätzlich eine Verminderung von störendem Lärm.

Die Entwicklung des BTT stellt einen deutlichen Beitrag zum Erreichen von Klimaschutzzielen im Hafengebiet, Binnen- und Seehafen, aber auch in der industriellen Anwendung, sowie bei Zubringerverkehren, dar. Durch den voll-elektrischen Antriebsstrang werden lokale Emissionen gänzlich vermieden. Die Fahrzeuge erzeugen bei Verwendung von erneuerbarer Energie keinerlei Luftverschmutzung, reduzieren den Lärm durch ihren Einsatz deutlich und sorgen auch für einen besseren Arbeitsplatz ihrer Fahrer.

Die Abstimmung der Hersteller mit den Anwendern führt zu einem Produkt das vom Kunden mitbeeinflusst ist und auf die Kundenansprüche abgestimmt werden kann. Die gemachten Erfahrungen bei den Hafenpartnern und die Wünsche der Fahrer werden in die Weiterentwicklung zum Seriengerät einfließen.

Für die Anwender bieten die Fahrzeuge Vorteile durch die Akzeptanz der Anrainer und die positive finanzielle Gesamtbilanz (TCO).

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Batterie-elektrischer Terminal Truck im Feldversuch	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Martin Hindersmann, Firma Paus Julius Jöhrens, ifeu Heidelberg Dr. Armin Schmiegel, Firma REFU Ulrich Altmann, NTM Neuss Boris Wulff, CTA Hamburg Heinz Eichner, Demag Cranes & Components (Konecranes)	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.11.2017
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) - Konecranes, Demag Cranes & Components GmbH, 40597 Düsseldorf - Hermann Paus Maschinenfabrik GmbH, 48488 Emsbüren - REFU Elektronik GmbH, 72793 Pfullingen - Neuss Trimodal GmbH, 41460 Neuss - HHLA Container Terminal Altenwerder, 21129 Hamburg - ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, 69121 Heidelberg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 16EM1004
	11. Seitenzahl 89
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) Stresemannstraße 128 - 130 10117 Berlin	13. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das Vorhaben war ein Verbundprojekt zwischen den drei industriellen Partnern Konecranes Gottwald , Hermann Paus Maschinenfabrik GmbH, REFU Elektronik GmbH und Neuss Trimodal GmbH, HHLA Container-Terminal Altenwerder GmbH, sowie dem ifeu Heidelberg für die Begleitforschung. Damit sind im Verbundprojekt führende deutsche Unternehmen aus den Bereichen Fahrzeugherstellung, Leistungselektronik und Logistik vereint, die zusammen die Entwicklung, die technische Umsetzung und den Feldversuch des neuen Fahrzeugkonzepts in einem realen betrieblichen Umfeld bearbeiten konnten. Die Projektpartner haben einen batterie-elektrisch angetriebenen Terminal Truck entwickelt und anschließend einen Prototyp aufgebaut und im Praxiseinsatz untersucht. Als Energiespeicher wurden zwei alternative Traktionsbatterien entwickelt und eingesetzt, wobei eine Li-Ionen-Batterie und eine Blei-Säure-Batterie verwendet wurden. Später wurde eine zweite Variante einer Li-Ion-Batterie als Projekterweiterung eingesetzt. Die technischen Daten von Li-Ionen-Batterien sind Blei-Säure-Batterien deutlich überlegen. Das System, bestehend aus Terminal Truck, Trailer und Batterien, wurde in einem Feldversuch auf zwei Containerterminal getestet. Das entwickelte Fahrzeugkonzept kann als Basis für eine Serienentwicklung herangezogen werden. Der Umweltnutzen des batterie-elektrischen Antriebsstrangs wurde im Rahmen einer umfangreichen ökologischen Begleitforschung bewertet. Die ökologische Bewertung des B-TT-Betriebs zeigte deutliche Vorteile des batterieelektrischen Antriebs gegenüber dem herkömmlichen Dieselantrieb. Die Treibhausgasemissionen konnten um 38 % (CTA) bzw. 17 % (NTM) gesenkt werden, der kumulierte Energieaufwand etwa im gleichen Maße. Durch die reduzierten Emissionen kann ein spürbarer Beitrag zur Luftqualität im Hafengebiet geleistet werden kann. Hinsichtlich Gewicht (und damit auch Energieverbrauch) werden von den Projektpartnern Konecranes und Paus für zukünftige B-TT-Serienfahrzeuge gegenüber dem Prototypen noch einige Reduktionspotentiale gesehen.	
19. Schlagwörter	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication)
3. title Batterie-elektrischer Terminal Truck im Feldversuch	
4. author(s) (family name, first name(s)) - Dr. Martin Hindersmann, Firma Paus - Julius Jöhrens, ifeu Heidelberg - Dr. Armin Schmiegel, Firma REFU - Ulrich Altmann, NTM Neuss - Boris Wulff, CTA Hamburg - Heinz Eichner, Demag Cranes & Components (Konecranes)	5. end of project 30.11.2017
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) - Konecranes, Demag Cranes & Components GmbH, 40597 Düsseldorf - Hermann Paus Maschinenfabrik GmbH, 48488 Emsbüren - REFU Elektronik GmbH, 72793 Pfullingen - Neuss Trimodal GmbH, 41460 Neuss - HHLA Container Terminal Altenwerder, 21129 Hamburg - ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, 69121 Heidelberg	9. originator's report no.
	10. reference no. 16EM1004
	11. no. of pages 89
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) Stresemannstraße 128 - 130 10117 Berlin	13. no. of references
	14. no. of tables
	15. no. of figures
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract The project was a joint project between the three industrial partners Konecranes Gottwald, Hermann Paus Maschinenfabrik GmbH, REFU Elektronik GmbH and Neuss Trimodal GmbH, HHLA Container Terminal Altenwerder GmbH, as well as ifeu Heidelberg for accompanying research. The joint project brings together leading German companies from the fields of vehicle manufacturing, power electronics and logistics, who were able to work together on the development, technical implementation and field test of the new vehicle concept in a real business environment The project partners developed a battery electric powered terminal truck and subsequently built a prototype and tested it in practice. As an energy storage, two alternative traction batteries have been developed and used, using a Li-ion battery and a lead-acid battery. Later, a second variant of a Li-ion battery was integrated as a project extension. The specifications of Li-ion batteries are clearly superior to lead-acid batteries. The system, consisting of terminal truck, trailer and batteries, was tested in a field trial on two container terminals. The developed vehicle concept can be used as a basis for series development. The environmental benefits of the battery-electric powertrain have been assessed in the context of extensive ecological accompanying research. The ecological evaluation of the B-TT operation showed clear advantages of the battery electric drive compared to the conventional diesel engine. Greenhouse gas emissions were cut by 38% (CTA) and 17% (NTM), and the cumulative energy consumption was about the same. The reduced emissions can make a noticeable contribution to the quality of the harbor's air. In terms of weight (and therefore energy consumption), the project partners Konecranes and Paus still see for future B-TT series production vehicles compared to the prototype reduction potential.	
19. keywords	
20. publisher	21. price