

2016 ABSCHLUSSBERICHT

Verbundprojekt BESIC

Batterie-Elektrische Schwerlastfahrzeuge
im Intelligenten Containerterminalbetrieb



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Das diesem Bericht zugrunde liegende Gesamtprojekt BESIC wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter den für die jeweiligen Teilprojekte genannten Kennzeichen durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

HHLA Container Terminal Altenwerder GmbH Bei St. Annen 1, 20457 Hamburg Korrespondierende Autoren: Boris Wulff	Förderkennzeichen: 01 ME 12092 Laufzeit Teilprojekt: 01.01.2013 – 30.06.2016
Terex MHPS GmbH Forststraße 16, 40597 Düsseldorf Korrespondierende Autoren: Armin Wieschemann, Heiko Schulz, Stefan Aldejohann	Förderkennzeichen: 01 ME 12093 Laufzeit Teilprojekt: 01.01.2013 – 30.06.2016
Vattenfall Europe Innovation GmbH Überseering 12, 22297 Hamburg Korrespondierende Autoren: Thomas Breitzkreuz, Karlheinz Gödderz	Förderkennzeichen: 01 ME 12094 Laufzeit Teilprojekt: 01.01.2013 – 31.03.2016
Technische Universität Clausthal als Träger des Energie-Forschungszentrum Niedersachsen Am Stollen 19A, 38640 Goslar Korrespondierende Autoren: Marcel Thiele	Förderkennzeichen: 01 ME 12095 Laufzeit Teilprojekt: 01.01.2013 – 30.06.2016
Georg-August-Universität Göttingen Professur für Informationsmanagement Platz der Göttinger Sieben 5, 37073 Göttingen Korrespondierende Autoren: Johannes Schmidt	Förderkennzeichen: 01 ME 12114 Laufzeit Teilprojekt: 01.01.2013 – 30.06.2016
Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg Department für Informatik Escherweg 2, 26121 Oldenburg Korrespondierende Autoren: Norman Ihle, Serge Runge Weitere Autoren: Claas Meyer-Barlag, Nico Grundmeier	Förderkennzeichen: 01 ME 12115 Laufzeit Teilprojekt: 01.01.2013 – 30.06.2016

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

BESIC Konsortium (2016): Batterie-Elektrische Schwerlastfahrzeuge im Intelligenten Containerterminalbetrieb (BESIC). Abschlussbericht im Rahmen des Förderprogramms IKT für Elektromobilität II. Hamburg.

Hamburg, 30.09.2016

Executive Summary

Mit dem BESIC-Projekt ist es gelungen, die Einsatzmöglichkeiten für Containertransporter mit batterieelektrischem Antriebsstrang (kurz B-AGV) konsequent weiterzuentwickeln. Aufbauend auf dem größtenteils vor Projektbeginn fertiggestellten Fahrzeugkonzept konnten im Container Terminal Altenwerder in Hamburg weitere Fahrzeuge mit wechselbaren Batteriesystemen aufgebaut und ein Feldtest mit einem nennenswerten Anteil von B-AGV in der Fahrzeugflotte aufgenommen werden. Die Fahrzeuge mit Wechselbatterien auf Basis von Blei-Batteriesystemen konnten frühzeitig in die Flotte eingebunden und die Ladeinfrastruktur in der vorhandenen Station ausgebaut werden. Somit war es erstmals möglich, die reguläre Betriebsweise eines Containerterminals mit B-AGV praktisch auszutesten. Es bestand beispielsweise die Möglichkeit, in einem sogenannten Gang auf der Seeseite zwischen Containerbrücken und Blocklagern ausschließlich mit B-AGV zu arbeiten. Zudem eröffneten sich gute Möglichkeiten, im BESIC-Projekt die Elektromobilität im geschlossenen Transportsystem und energie-wirtschaftliche Geschäfts-/Anwendungsfälle näher zu untersuchen.

Durch die schrittweise Entwicklung eines Batterien-Verwaltungs-Systems (BVS) konnten in Bezug auf die vollständige Automatisierung und die Gesamtleistungsfähigkeit des B-AGV-Systems wesentliche Fortschritte erzielt werden. In einer frühen Entwicklungsphase des BVS wurden eine operative Überwachung der Batterieladestände und die Ansteuerung der Ladegeräteeinheiten in der Station realisiert. Die Flottenversuche im BESIC-Projekt zeigten auf, wie wichtig es ist, die Zeitpunkte für den Batteriewechsel mit der Verfügbarkeit frisch geladener Wechselbatterien in der Station abzustimmen und das gleichzeitige Eintreten von Batteriewechselbedarf bei mehreren Fahrzeugen zu verhindern. Darüber hinaus ergaben die Flottenversuche, dass die nominale Ladungsträgerkapazität der Batteriesysteme stärker ausgeschöpft werden sollte und die durchschnittliche Einsatzdauer der Fahrzeuge mit Aufladung einer Wechselbatterie erhöht werden könnte. In einer weiteren Entwicklungsphase wurde eine sogenannte logistische Optimierung im BVS umgesetzt, so dass es Batteriewechselbedarfe vorausschauend ermitteln und gegebenenfalls die frühzeitige Ausfahrt zur Station anordnen kann. Daneben wurde im BESIC-Projekt ein Zweitnutzenkonzept erarbeitet, welches eine Einbeziehung des Containerterminalbetriebs mit B-AGV-System als flexiblen Verbraucher bedeutete. Im Brückenschlag zwischen der Logistik- und der Energiewirtschaftsdomäne wurde eine Reduzierung der Gesamtkosten für das Laden entlang der Kette für die Strombeschaffung und die Bereitstellung von Minutenreserve angestrebt. In einer für das BESIC-Projekt abschließenden Entwicklungsphase wurde das BVS derart eingerichtet, dass Statusinformationen zu den Wechselbatterien und Ladegeräteeinheiten an ein erweitertes Energie-Management-System (EMS) weitergegeben und dortige Wünsche für das Zu- oder Abschalten verarbeitet werden können. Indes kann das BVS auf die Dringlichkeit für das Aufladen der Wechselbatterien eingehen und stellt unter allen Umständen einen unbeeinträchtigten Logistikbetrieb sicher.

im Hinblick auf einen vermittelten Zugang zum Stromgroßhandel sowie dem Minutenreservemarkt wurden im BESIC-Projekt mehrere Anwendungskomponenten zur Erweiterung des betrieblichen EMS entwickelt. In erster Linie wurde ein Simulationswerkzeug geschaffen, welches mit Informationen über das Eintreffen und die Abfertigung von Containerschiffen arbeitet und die von den B-AGV geforderte Transportlast sowie den Gesamtverbrauch des Containerterminals im Verlauf der nächsten ca. 40 Stunden vorhersagen lässt. Dies ermöglicht dann in zweiter Linie eine Vortagsplanung des Einsatzes von Wechselbatterien (Werkzeug für die Erstellung von energie-wirtschaftlichen Ablaufplänen) und die Steuerung der stationären Ladeprozesse am kommenden Tag (Werkzeug für die Ablaufplanausführung). Dank der Erweiterungskomponenten kann das EMS als ein Signalempfänger für den automatisierten Abruf von Minutenreserve fungieren, koordiniert Schalthandlungen gegenüber dem Batterien-Verwaltungs-System (BVS) und übermittelt die zum Nachweis einer Erbringung von Regelenergie erforderlichen Messdaten nach außen.

Auf Energiewirtschaftsseite wurde im BESIC-Projekt das Demand-Response-System (DRS) weiterentwickelt, indem der Standard OpenADR aufgegriffen wurde. Der auf dem Standard OpenADR basierende Kommunikationsweg zwischen DRS und EMS hat sich unter besonderer Berücksichtigung der Erfordernisse des deutschen Minutenreservemarktes als robust herausgestellt und unterstützt auch die marktüblichen Nachweisinstrumente. Die Anwendung des OpenADR Standards machte unter den Anforderungen des BESIC-Projekts keinerlei Anpassungen hinsichtlich des Nachrichtenaufbaus nötig. Es konnten mit den Flexibilitätsangaben, einschließlich einer variablen Bepreisung des Strombezugs sowie der Lastgangvoranmeldung, der Abrufsignalisierung und der fortlaufenden Messwertübermittlung sämtliche funktionalen Anforderungen an die Einbindung der Batterieladestation aus dem Containerterminalbetrieb in die Aggregationsplattform erfüllt werden. Auf der Energiewirtschaftsseite konnte bezüglich der Registrierung der via OpenADR angebotenen Anlagen und der Verwaltung von Abrufereignissignalen auf eine Basisimplementierung zurückgegriffen werden. Auf der Terminalseite ließen sich vorgefertigte Klassenbibliotheken (für die Nachrichtenobjekte) verwenden. Insgesamt fiel damit der Implementierungsaufwand beiderseits niedrig bis moderat aus.

In mehrwöchigen Flottenversuchen zum gesteuerten Laden konnte nachgewiesen werden, dass die Batterieladestation auf Aufruf teilweise oder gänzlich in geeigneter Weise sowohl zur Lasterhöhung als auch zur Lastabsenkung bereitsteht. Durch eine Verringerung des maximalen Ladestroms wurden eine Vergleichmäßigung der Ladeleistung und in weiterer Folge eine verbesserte Eingriffsmöglichkeit bei den Ladeprozessen erreicht. Mit den gemachten Erfahrungen und der Weiterentwicklung aus dem BESIC-Projekt lässt sich mutmaßen, dass sich eine weiter ausgebauten Batterieladestation mit einem größeren Pool an Wechselbatterien ebenso gut oder sogar besser in die Aggregationsplattform einbinden ließe. Ausschlaggebend dafür sind die Möglichkeiten, die Ladestandsentwicklung der Wechselbatterien und ihren Umlauf treffsicher vorhersehen und operativ überwachen zu können. Ein wenig hinderlich ist die Tatsache, dass die Ladestellen für die Blei-Batteriesysteme in der derzeitigen Ausführung nur komplett an- und ausgeschaltet werden können. Deshalb ist die Batterieladestation nur zu einer stufenweisen Lasterhöhung oder Lastabsenkung in der Lage und nicht so schnellreaktionsfähig wie sonst bei einem Batteriespeichersystem üblich. Die Umschaltgeschwindigkeit für die einzelnen Ladestellen genügt den Anforderungen des Minutenreservemarktes hinsichtlich der Benachrichtigungsmöglichkeiten und dem Eintreten der Leistungsänderung. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass der Containerterminalbetrieb von der Art seiner kommunikativen Anbindung mittels OpenADR für die Anforderungen des Sekundärregelleistungsmarktes gerüstet wäre. Für einen kleinen Anteil von B-AGV in der Flotte konnte im BESIC-Projekt demonstriert werden, dass die planvoll gehandhabten Steuerungseingriffe bei den Ladeprozessen unter verschiedenen Logistikanforderungen mit der regulären Betriebsweise für den Containerterminalbetrieb verträglich und mit lokalen Maßnahmen zur Vermeidung von Spitzenverbrauchswerten vereinbar sind.

Neben den sieben B-AGV mit Wechselbatterien auf Basis von Blei-Batteriesystemen wurde im BESIC-Projekt auch ein B-AGV für die Verwendung von Lithium-Batteriesystemen hergerichtet. Dabei wurden genau genommen ein erstes Batteriesystem mit Lithium-Ionen-Polymer-Technologie (Typ 1) und ein zweites Batteriesystem mit Lithium-Metall-Polymer-Technologie (Typ 2) in die Erprobung ins Feld gebracht. Beide Lithium-Batteriesysteme konnten an einem einzigen Ladeplatz in der Station, das heißt mit einer speziellen Ladegeräteinheit wechselweise kontaktiert und aufgeladen werden. Hinsichtlich des Einsatzes von Lithium-Batteriesystemen im regulären Terminalbetrieb konnten wichtige Erfahrungen gesammelt werden. Sie zeichnen sich im Vergleich zu den Blei-Batteriesystemen durch eine konstantere Spannungslage aus; unter vergleichbarer Zuladung von Containern treten geringere Ströme auf. Es bestätigte sich im BESIC-Projekt, dass mit Lithium-Batteriesystemen nicht zuletzt aufgrund des niedrigeren Eigengewichts beim Fahren eine geringere Leistung erforderlich wird; im Vergleich zu den Blei-Batteriesystemen ließ sich der Stromverbrauch im operationellen Betrieb um gut ein Fünftel reduzieren.

Inhalt

1	Einführung	1
1.1	Projektbeschreibung	1
1.2	Überblick zur IKT-Systemlandschaft.....	3
1.3	Übersicht der Projektstruktur	5
2	Erweiterung des betrieblichen Energiemanagements im Containerterminal.....	9
2.1	Einbeziehung eines Containerterminalbetriebs als flexiblen Verbraucher	9
2.2	Entwicklung von Werkzeugen zur Vorhersage des Logistikgeschehens sowie des Energiebedarfs	23
2.3	Entwicklung von Werkzeugen zur energiewirtschaftlich optimierenden Ablaufplanung.....	47
3	Flottenversuche rein elektrisch angetriebener Containertransporter unter Realbedingungen	66
3.1	Aufbau der Fahrzeuge und Wechselbatterien.....	66
3.2	Erweiterung der Ladeinfrastruktur in der Station	70
3.3	Durchführung von Flottenversuchen zum regulären Betrieb.....	75
3.4	Entwicklung eines Batterien-Verwaltungs-Systems (BVS).....	81
3.5	Durchführung von Flottenversuchen mit logistischer Optimierung	84
3.6	Testverfahren zu logistisch optimierten Batteriewechseln	91
3.7	Weiterentwicklung des Demand Response Systems (DRS)	92
3.8	Entwicklung eines Werkzeugs zur Ausführung energiewirtschaftlicher Ablaufpläne.....	94
3.9	Durchführung von Flottenversuchen mit gesteuertem Laden	109
4	Untersuchung von Lebenszykluskosten verschiedener Batteriesysteme	125
4.1	Durchführung von Simulationsstudien zu Auslegungsfragen.....	125
4.2	Leistungstests für Lithium-Batteriesystemaufbauten und Umbau in Wechselbatterien.....	131
4.3	Erprobung von Wechselbatterien auf Basis von Lithium-Batteriesystemen im Feld.....	144
4.4	Untersuchung der Degradation der Lithium-Batteriesysteme auf Modulebene	148
4.5	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	160

1 Einführung

1.1 Projektbeschreibung

BESIC ist als ein Pilotvorhaben zur Untersuchung der Elektromobilität in geschlossenen Transportsystemen im Einsatzgebiet Logistik und Produktion skizziert. Es ist der Grundgedanke dieses Forschungs- und Entwicklungsvorhabens im Bereich des Wirtschaftsverkehrs, die Elektromobilität im betrieblichen Umfeld fortzuentwickeln und vor allem die Synergiepotenziale überschaubarer Wechselwirkungen des Transport- und Energiesektors zu heben.

Eine IKT-gestützte Planung und Steuerung der Ladevorgänge für die Elektroschwerlastfahrzeuge soll die betriebsgemäße Flexibilität unter Berücksichtigung der Umschlagsintensität im Containerterminal ausschöpfen und zusätzliche Möglichkeiten zur Bewirtschaftung des Strombeschaffungsportfolios bzw. zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien am Stromverbrauch eröffnen. Die zu konzipierenden IKT-Lösungen sollen im Schnittbereich von Elektromobilität und Smart Grid-Anwendungen liegen. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf einem mit der Fahrzeugsteuerung zu integrierenden Batteriemanagementsystem. Darüber hinaus werden Anwendungs- und Geschäftsfälle für die aktive Partizipation des Containerterminals an den Strommärkten im Zuge der Elektromobilität entwickelt und diese in einem Konzept für ein betriebliches Lastmanagementsystem umgesetzt. Des Weiteren wird das Konzept gesteuerten Ladens aus der Perspektive der Energiewirtschaft weiterentwickelt und der Transfer zu den IKT-Lösungen aus dem Bereich privater Haushalte gewährleistet. Dieses soll sowohl für Stromabnehmer als auch für Stromlieferanten Kostenvorteile versprechen und sich auf verwandte Anwendungskontexte übertragen lassen.

Die Schwerpunkte in diesem Forschungsvorhaben lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Integration weiterer Batterie-AGV in die Fahrzeugflotte im Container Terminal Altenwerder und Flottenversuche Batterie-AGV mit Batteriewechseln unter Realbedingungen zur Erreichung der Serienreife der Batterie-AGV und entsprechender Ladeinfrastrukturen
- Untersuchung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses für alternative Batteriesysteme, insbesondere Lithium-Ionen-Technologie, bei Wechselbatterien unter den Anforderungen von Schwerlastfahrzeugen
- Entwicklung von IKT-Anwendungskonzepten für ein übergeordnetes Batterien-Verwaltungs-System sowie eines erweiterten betrieblichen Energiemanagementsystems, wodurch die Flexibilität im Containerterminalbetrieb im Zuge der Elektromobilität genutzt und vermarktet werden kann.
- Erstellung eines Bewirtschaftungskonzepts für die Zweitnutzung eines quasi-stationären Speichervolumens von Wechselbatterien in geschlossenen Transportsystemen wie dem auf der Seeseite des Container Terminal Altenwerder
- Bessere Ausschöpfung des Potenzials von Stromerzeugungsanlagen auf Basis erneuerbarer Energien
- Charakterisierung des Containerterminalbetriebs als ein geschlossenes Transportsystem und Analyse der Multiplikationseffekte bei verwandten Anwendungskontexten wie zum Beispiel auf dem Vorfeld bei Flughäfen.

Im Kontext maritimer Technologien, insbesondere im Bereich der Containerlogistik, kann ein Grundstein für die gewerbliche Durchdringung der Elektromobilität im Nutzfahrzeugsegment und der besseren Ausschöpfung des Potenzials erneuerbarer Energien gelegt werden. Hintergrund ist der erhebliche Transportbedarf in Containerterminals. Allein im Hamburger Hafen werden jährlich bis zu 10 Mio. TEU (Twenty-foot-Equivalent-Unit, 20-Fuß-Standardcontainer) umgeschlagen, wobei jeder Container innerhalb des Hafens über spezielle Schwerlastfahrzeuge transportiert werden muss. Solche Schwerlastfahrzeuge bieten aufgrund ihrer Fahrprofile und der klar

definierten Einsatzorte hervorragende Voraussetzungen für einen erfolgreichen Einsatz batterie-elektrischer Antriebsstränge in Kombination mit Wechselbatterien.

Es gibt Indikatoren dafür, dass batterie-elektrische Schwerlastfahrzeuge in den Einsatzgebieten von Logistik und Produktion ihre Vorzüge haben werden: Zum einen gibt es insbesondere in Küstennähe infolge der Nutzung von Windenergie eine hohe Verfügbarkeit elektrischer Energie. Auch die mit Offshore-Windkraftanlagen gewonnene elektrische Energie kann an Land in Wechselbatterien gespeichert werden. Zum anderen schwankt der Momentanbedarf an elektrischer Energie eines Containerterminals relativ gut absehbar in Abhängigkeit von der jeweiligen Umschlagsintensität. Dabei wird es möglich sein, aus der Auftragshistorie und den Auftragsbüchern eines Terminalbetreibers sowie externen Logistikanbietern zunächst die Transportbedarfe und davon abgeleitet die Energiebedarfe abzuschätzen. Durch eine genaue mengenmäßige Abschätzung und Möglichkeiten der zeitlichen Lastverschiebung ließe sich der Strombezug intelligent ausgestalten („Smart Charging“), weshalb seitens des Stromversorgers eine Steigerung der Effizienz im Betrieb der Stromnetze sowie eine Milderung von Großhandelsrisiken und kundenseitig eine Reduktion der Strombezugspreise möglich sind.

Auf Basis von Voruntersuchungen soll gemäß einem Verwertungskonzept im Container Terminal Altenwerder ein Pilotvorhaben zur Elektromobilität im Nutzfahrzeugsegment mit Nähe zu Offshore-Windparks begründet werden. Im Container Terminal Altenwerder soll exemplarisch für das Einsatzgebiet Logistik und Produktion die Netzintegration von vollständig elektrifizierten Schwerlastfahrzeugen untersucht und die daraus erwachsenden Synergiepotenziale herausgearbeitet werden. Im Containerhafenbereich werden Flotten von Schwerlastfahrzeugen in eng umgrenzten Werksflächen eingesetzt. Darum ergibt sich betrieblich bedingt eine hohe Verfügbarkeit umlaufender Wechselbatterien am Stromnetz. Bei einem großen Anteil batterie-betriebener Schwerlastfahrzeuge in Containerterminals bieten die Wechselbatterien ein nennenswertes quasi-stationäres Speichervolumen mit einer hohen lokalen Leistungsdichte.

1.2 Überblick zur IKT-Systemlandschaft

Bezüglich des Managements der Fahrzeugflotte stellen die Fahrzeugsteuerungen und das AGV-Management-System (AGV-MS) eine fundamentale Steuerungsebene dar; so können Batteriesysteminformationen für die Wechselbatterien an Bord erfasst und die Fahrzeuge zu einem Batteriewechsel zur Station beordert werden. In Bezug auf das Management der Station stellen die Zugangskontrolle und die Steuerung des Regalbediengerätes sowie die Ladegerätesteuern und deren Ansteuerung über die Ladegerätecontainer eine fundamentale Steuerungsebene dar; so können die Wechselbatterien stationär geladen, Batteriesysteminformationen für die kontaktierten Wechselbatterien erfasst, die Fahrzeuge bei der Zufahrt zur Wechselposition vereinzelt und die Batteriewechsel vorgenommen werden. Sämtliche Batteriesysteminformationen fließen im Batterien-Verwaltungs-System zusammen, so dass beispielsweise eine Unterschreitung eines Schwellwerts für den Batterieladezustand erkannt und der Bedarf für einen Batteriewechsel festgestellt werden kann. Indes die Fahrzeugsteuerungen über die anstehenden Fahraufträge und das AGV-MS mit Auftragszuweisung und Wegfindung allein mit dem Logistiksystemgeschehen befasst sind, setzt sich das BVS operativ planend mit dem Geschehen der Elektrizitätsbereitstellung an die Fahrzeuge auseinander.

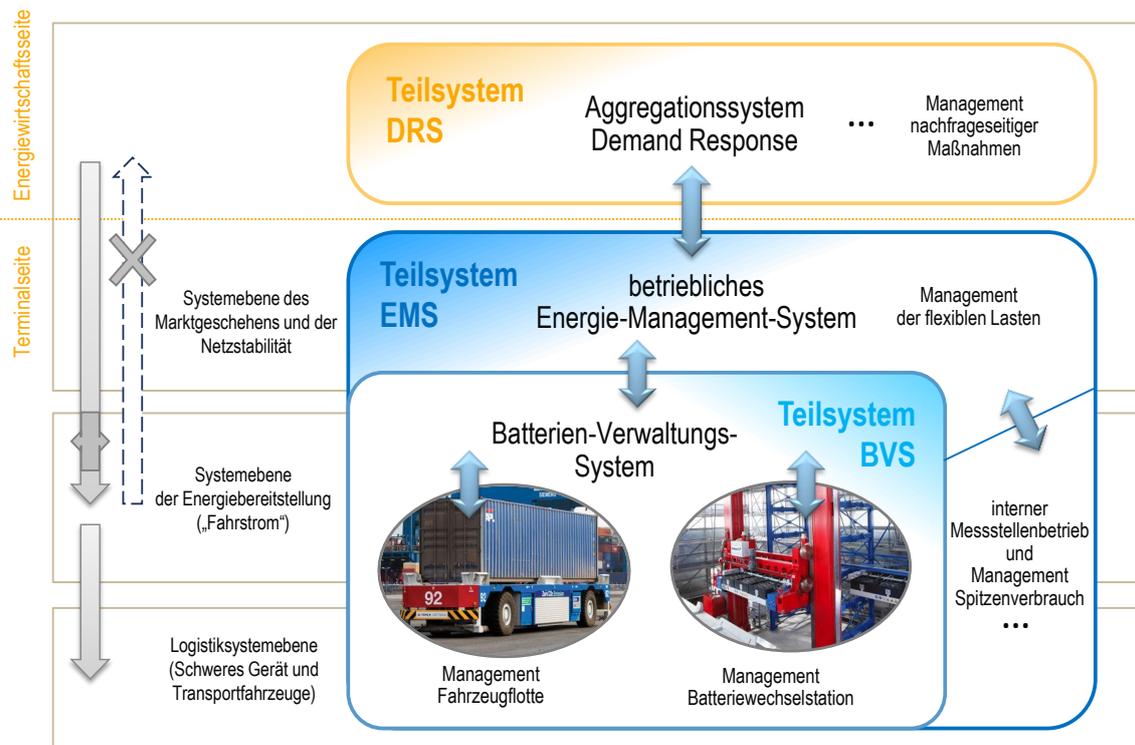


Abbildung 1: Übersicht der Schnittstellen von IKT-Systemen rund um das gesteuerte Laden
(Informationsfluss, Stromfluss)

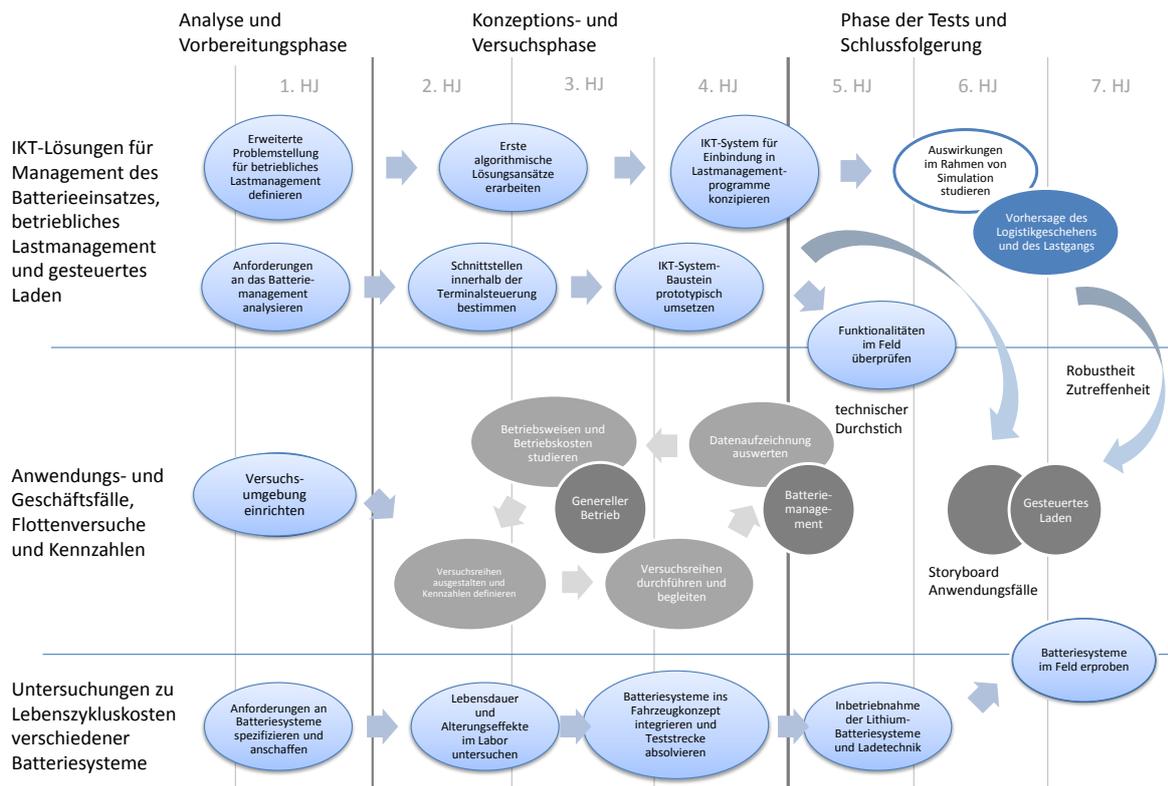
Das Batterien-Verwaltungs-System zur operativen Planung und Steuerung der Abläufe im AGV-System steht im Informationsfluss mit einem betrieblichen Energie-Management-System (EMS); es stellt die momentanen Informationen über die Ladezustände der Wechselbatterien und die Leistungsaufnahme an den Ladeplätzen bereit und nimmt Schaltwünsche für die Ladeplätze entgegen. In aller Regel wird den Wünschen zum An- oder Abschalten einer Ladegeräteeinheit prompt entsprochen; doch es wird durch das BVS der Vorrang des Logistikgeschehens bzw. die Verfügbarkeit von B-AGV sichergestellt. Das EMS ist auf der Seite des Containerterminalbetriebs lose mit dem BVS gekoppelt und für dessen Beteiligung am Strommarkt und dem Minutenreservemarkt angelegt. Jeweils einen Tag im Voraus werden die aus der Terminalbetriebssoftware (TOS) bereitgestellten Informationen zu den Ankunfts- und Abfertigungszeiten der Schiffe sowie den zu erwartenden Containerbewegungen

dazu verwendet, Vorhersagen über die Transportlast der B-AGV und den Strombedarf dieser Fahrzeuge zu machen. Darauf aufbauend können eine energiewirtschaftliche Ablaufplanung durchgeführt, die voraussichtliche Lastgangkurve bekanntgegeben und Lastverschiebungspotenziale bei einem Aggregator für den Minutenreservemarkt angeboten werden. Der Informationsfluss zwischen dem EMS und einem Demand-Response-System (DRS, hier auch als Anwendung gesteuertes Laden bezeichnet) besteht aus der Abholung von Preisinformationen, der Lastgangvoranmeldung und dem Angebot von Flexibilität am Tag voraus sowie Mitteilungen über den Verfügbarkeitsstatus und Abrufereignisse am folgenden Tag. Seitens des Aggregators wird die Flexibilität des Containerterminals innerhalb des Managements eines virtuellen Kraftwerks mit der Flexibilität anderer Anlagen gebündelt. Er vermittelt dem Containerterminal einen Zugang zum Minutenreservemarkt und platziert dort Minutenreserveangebote auf der Grundlage der ihm angebotenen Zuschalt-/Abschaltpotenziale. Seitens des Containerterminals können Abschaltpotenziale vorbehalten und dazu genutzt werden, um Spitzenverbrauchs- werte zu vermeiden. Neben anderen Verbrauchsgruppen im Containerterminal wird dann die Leistungsaufnahme in der Ladestation so weit wie möglich reduziert. Der Stromfluss ist unidirektional angelegt: An den Ladeplätzen wird elektrische Energie in die Wechselbatterien eingespeichert und dann über diese an die Fahrzeuge verteilt. An Bord der Fahrzeuge wird den Wechselbatterien elektrische Energie entzogen und für den Antrieb verwendet. In der Station kann nicht rückgespeist werden.

1.3 Übersicht der Projektstruktur

Es gibt im Wesentlichen drei Arbeitsstränge, die eine Einteilung des BESIC-Vorhabens in unterschiedliche Phasen ausmachen:

- Einen vordergründigen Arbeitsstrang bilden die Flottenversuche. Zunächst werden die Versuchsumgebungen im Containerterminalbetrieb eingerichtet. Dazu werden weitere batterie-elektrische AGV in Betrieb genommen sowie die Ladeinfrastruktur erweitert. Dann werden in Abstufungen einfachere und spezifischere Flottenversuchsreihen geplant und die Versuchsanordnungen gestaltet bzw. die Versuchsumgebungen ggf. angepasst. Nach der jeweiligen Durchführung und Begleitung einer Flottenversuchsreihe werden die Aufzeichnungen von Betriebs- und Energiedaten ausgewertet und somit die Betriebsweisen und Betriebskosten studiert.
- Die Erweiterung des betrieblichen Energie-Management-Systems macht einen weiteren zentralen Arbeitsstrang aus. Es werden zunächst die Anforderungen an Planungs- und Steuerungskomponenten für das Management des Einsatzes der batterie-elektrischen Fahrzeuge und ihrer Wechselbatterien analysiert. Daraufhin werden die Problemstellungen im Bereich der Planung und Optimierung definiert und algorithmische Lösungen erarbeitet. Die Konzeptentwicklung für die Disposition von Ladeprozessen unter den logistischen Anforderungen wird zum Abschluss gebracht und eine prototypische Umsetzung angegangen.
- Ein hintergründiger Arbeitsstrang ist die Betrachtung unterschiedlicher Typen von Batteriesystemen für die Verwendung im Containertransporter. Es werden die Anforderungen hinsichtlich des Einbaus in den Wechselrahmen und der automatisiert vorzunehmenden Batteriewechsel spezifiziert und dann Batteriesysteme in der für ein Schwerlastfahrzeug passenden Größenordnung angeschafft. Es werden zunächst Leistungstest und Untersuchungen der Alterungseffekte im Labor unternommen. Dann werden die Batteriesysteme in den Anwendungskontext gestellt, um eine Integration der Batteriesysteme in das Gesamtfahrzeugkonzept batterie-elektrischer AGV zu überprüfen. Schließlich werden die Batteriesysteme im Feld erprobt, um die tatsächlichen Lebenszykluskosten zu ersehen und das Kosten-Nutzen-Verhältnis Batteriesystemen auf Basis von Blei-Säure-Akkumulatoren (Blei-Batteriesystemen) sowie Lithium-Ionen-Polymer-Akkumulatoren und Lithium-Metall-Polymer-Akkumulatoren (Lithium-Batteriesysteme) für eine Verwendung in geschlossenen Transport- und Logistiksystemen beurteilen zu können.



Grober Netzplan für das Gesamtvorhaben mit den wesentlichen Arbeitssträngen und Phasenaufteilung

Analyse- und Vorbereitungsphase

In einer ersten Phase werden auf der Forschungsseite notwendige Literaturrecherchen unternommen und es wird sich in den Anwendungskontext eingearbeitet. Dies erfolgt im wechselseitigen Austausch mit der Anwender- und Verwerterseite, wo eine Analyse der Anforderungen für die Integration eines Anteils elektromobiler Transportfahrzeuge stattfindet. Die Anforderungsanalyse bezieht sich insbesondere auf den Bereich der Planungs- und Steuerungssysteme für den Containerterminal, wo zum Beispiel die Anknüpfungspunkte für eine Entwicklung eines Batterien-Verwaltungs-Systems, den Entwurf von betrieblichen Lastmanagementanwendungen und die weitere Konzeption für gesteuertes Laden unter die Lupe genommen werden. Die Ermittlung der Anforderungen ist aber auch auf den Bereich der zu untersuchenden Batteriesysteme ausgedehnt. Denn schließlich sollen diese sowohl für eine Einbindung in das bisherige Fahrzeuggesamt-konzept geeignet als auch mit der erweiterten Ladeinfrastruktur verträglich sein. Auf der Anwenderseite wird in dieser ersten Phase primär die Einrichtung der Versuchsumgebung angegangen, was mit der Umrüstung von Transportfahrzeugen, dem Aufbau von Wechselbatterien und der Erweiterung der Ladeinfrastruktur verbunden ist. Währenddessen werden auf der Forschungsseite für die Einführung der Elektromobilität im Anwendungskontext des Containerterminalbetriebs verschiedene Systemebenen (Logistiksystem plus System der Energiebereitstellung) herausgearbeitet. Im Zuge der Elektromobilität ergibt sich eine erweiterte Planungs- und Optimierungsproblemstellung, die in der ersten Phase definiert werden soll.

Konzeptions- und Versuchsphase

In der zweiten Phase wird die Einrichtung der Versuchsumgebung im Anwendungskontext abgeschlossen. Im Anschluss daran werden die Flottenversuchsreihen in Angriff genommen werden können. In einer anfänglichen Flottenversuchsreihe wird in dieser Phase der generelle Betrieb untersucht werden können, das bedeutet die weitgehende Integration des Anteils batterie-elektrischer Transportfahrzeuge mit den herkömmlichen Planungs- und Steuerungssystemen.

Für diese und spätere Flottenversuchsreihen wird ein Arbeitszyklus verfolgt: Die Versuchsreihen müssen für sich genommen inhaltlich und technisch vorbereitet werden. Später sind womöglich auch technische Umstellungen und Erweiterungen der Versuchsumgebung erforderlich. Unterdessen werden die Versuchsreihen jeweils auch inhaltlich vorbereitet und dazu geeignete Kennzahlen definiert. Danach können auf der Anwenderseite entsprechende Versuchsfahrten und Flottenversuche durchgeführt werden, die in erster Linie von der Verwerterseite wie auch von der Forschungsseite begleitet werden. Nach der Durchführung der Flottenversuche werden die aufgezeichneten Betriebs- und Energiedaten ausgewertet. Anschließend werden die neueren Erkenntnisse in die Betriebskostenrechnung eingearbeitet und die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vorangetrieben.

Begleitend werden zunächst die Schnittstellen im Terminalleitsystem abgeklärt und ein Lastenheft für die Entwicklung eines Batteriemanagementsystems erstellt. Gegen Ende der zweiten Phase wird ein Batteriemanagementsystem prototypisch als ein Baustein des Terminalleitsystems umgesetzt. Dieses betrifft den Einsatz der batterie-elektrischen Transportfahrzeuge und die Durchführung von Batteriewechseln, so dass die logistischen Anforderungen in Bezug auf die AGV-Steuerung und die Steuerung der Batteriewechselstation gemeistert werden können.

Darüber hinaus wird in der zweiten Phase die Konzeption von betrieblichen Lastmanagementanwendungen weitergeführt. Es werden erste algorithmische Lösungsansätze für die integrierte Planungsproblemstellung erarbeitet, das heißt die Planung des Fahrzeug- und Batterieeinsatzes im Einklang zu den Umschlags- und Transportkapazitäten sowie den Kapazitäten der Energiebereitstellung zu unterstützen. Später sollen in der zweiten Phase Anhaltspunkte dafür gewonnen werden, den Batterie- und Fahrzeugeinsatz sowie die Disposition der Ladevorgänge von Wechselbatterien unter logistischen und energiewirtschaftlichen Anforderungen zu optimieren. Zur Entwicklung von intelligenten Ladestrategien wird in der zweiten Phase auch maßgeblich durch eine Entwicklung von Anwendungs- und Geschäftsfällen für die Einführung von Elektromobilität im Containerterminalbetrieb beigetragen. Aus der Perspektive der Energiewirtschaft wird außerdem in der dieser Phase das Konzept des gesteuerten Ladens von Fahrzeugbatterien in den industriellen Anwendungskontext übertragen.

Daneben werden möglichst früh in der zweiten Phase die Leistungstests abgeschlossen und die Degradationsuntersuchungen der verschiedenen Batteriesysteme unternommen. Mit Abschluss der Untersuchungen im Labor werden gegen Ende der zweiten Phase eine Parametrierung von Lebensdauermodellen vorgenommen und somit eine Degradationsabschätzung für die typischen Lade-/Entlade-Muster im Anwendungskontext ermöglicht. Zeitgleich werden die Lithium-Batterien aus dem Systemaufbau in Wechselrahmen integriert und Fahrten der Transportfahrzeuge auf einer Teststrecke durchgeführt. Die Testfahrten müssen absolviert werden, ehe zum Abschluss dieser zweiten Phase die Lithium-Batterien erstmals im Feld erprobt werden können.

Phase der Tests und Schlussfolgerungen

Eingangs der dritten Phase sollen die Funktionalitäten des zu entwickelnden Batteriemanagementsystems in einer Flottenversuchsreihe überprüft werden. Hier gibt es inhaltlich-zeitlich einen starken Berührungspunkt des Arbeitsstrangs der IKT-System-Entwicklung in Richtung der Steuerung und Planung für den Containerterminalbetrieb und des Arbeitsstrangs der Flottenversuchsreihen; durch die Flottenversuche werden die Aussichten auf zukünftige modulare Erweiterungen des Terminalleitsystems verbessert. Dies bedeutet an dieser Stelle den wiederkehrenden Arbeitszyklus der Flottenversuchsreihen mit Definition von Kennzahlen, Durchführung der Versuchsfahrten, Auswertung der Betriebs- und Energiedaten bis hin zur Aktualisierung der Betriebskostenrechnungen und des Studiums neuartiger Betriebsweisen.

Zum späteren Zeitpunkt wird in der dritten Phase ebenso die Flottenversuchsreihe für den Proof-of-Concept

eines gesteuerten Ladens durchgeführt.

Aufgrund des nennenswerten quasi-stationären Batteriespeichervolumens im Schwerlastbereich ist es interessant, im Übergang zur dritten Phase bei der Anwendungs- und Geschäftsfallentwicklung die Einbindung des Containerterminalbetriebs in zukünftige Demand-Response-Systeme (DRS) zu überlegen. Es greift hier die Konzeptentwicklung für ein betriebliches Lastmanagementsystem und die Überlegungen zur Einbindung der flexiblen Lasten aus dem Containerterminalbetrieb im Sinne gesteuerten Ladens ineinander. Das Anwendungskonzept für betriebliches Lastmanagement im Containerterminalbetrieb wird bezüglich der Herausforderungen und Chancen im Smart Grid- bzw. Smart Market-Umfeld weiterentwickelt. Dabei spielt es mit eine Rolle für die Realisierung des Konzepts gesteuerten Ladens, insofern es neben den kundenseitigen eigenen Zielstellungen zur Netzstabilisierung zwecks Einsparung von Netznutzungsentgelten auch die Zielstellung einer Beteiligung des Containerterminalbetriebs in DR-Programmen von Akteuren der Energiewirtschaft (Aggregatoren und Lieferanten) berücksichtigen lässt. Eine Einbindung des Containerterminalbetriebs unter dem Konzept gesteuertes Laden soll im Rahmen einer Flottenversuchsreihe in der dritten Phase untersucht werden. Die Auswirkungen intelligenter Ladestrategien können im Rahmen einer Simulation einer zuvor fertig gestellten virtuellen Gesamtsystemumgebung analysiert werden. Auf diese Weise können die Ein- und Ausgabewerte zu den Planungs- und Optimierungsartefakten von der Forschungsseite in einer geschützten realitätsnahen Umgebung getestet werden.

Ergänzend zu den Flottenversuchen werden in der dritten Phase die Batteriesysteme auf Basis von Lithium-Ionen-Technologie im Feld erprobt werden. Dies ergibt klare Berührungspunkte zwischen dem Arbeitsstrang der Batterieuntersuchungen und dem Arbeitsstrang der Flottenversuchsreihen. Im Feldtest werden die Lithium-Batterien neben den bisher favorisierten Blei-Säure-Batterien betrieben. Dieser Probebetrieb der Lithium-Batterien im Feld kann ausgelöst durch eine Meilensteinentscheidung in dieser Phase intensiviert werden.

2 Erweiterung des betrieblichen Energiemanagements im Containerterminal

2.1 Einbeziehung eines Containerterminalbetriebs als flexiblen Verbraucher

Mit der Einführung von Elektromobilität im Container Terminal Altenwerder (CTA) werden elektrische Batteriespeichersysteme ins Feld geführt, die zwischen den Ladestellen und den Transportfahrzeugen automatisiert hin und her gewechselt und während ihres Aufenthalts in der Station geladen werden können. Zunächst wurde eine Bestandsaufnahme der disponiblen Lasten (auf Basis der Ladeprozesse der Wechselbatterien) und ihrer Abhängigkeit von der Terminalauslastung durchgeführt. Für ein Fachkonzept über eine Zweitnutzung der Wechselbatterien wurden zudem im Hinblick auf die Elektrizitätsmärkte und deren aktuelle Regularien mögliche energiewirtschaftliche Anwendungs-/Geschäftsfälle analysiert. Dabei wurden sowohl die Perspektive des Containerterminalbetriebs als auch die eines Stromlieferanten oder eines Anlagenaggregators eingenommen. Im Weiteren wurde auf Grundlage einer Referenzarchitektur (ERA) ein Softwareentwurf für die Erweiterung des betrieblichen Energie-Management-Systems und die Anbindung der Batterieladestation in einen Anlagenpool gemacht. Außerdem wurden vorab einer späteren Umsetzung der konzeptionell ausgearbeiteten Anwendungskomponenten verschiedene Standards für den elektronischen Datenaustausch zwischen einem Anlagenaggregator und einem Containerterminalbetrieb angeschaut und bewertet.

2.1.1 Identifikation energiewirtschaftlicher Geschäfts-/Anwendungsfälle

Bis dato gilt es unter dem Gesichtspunkt der Netzstabilität als wünschenswert, dass Industriekunden ihren Stromkonsum in bekannte Schwachlastzeiträume wie zum Beispiel Nachfragetäler zur Nacht verschieben bzw. diesen aus Zeiträumen von Spitzenlast wie beispielsweise Nachfragehöhen am Tage herausziehen. In Folge einer veränderten Erzeugungslandschaft mit zunehmend fluktuierender Einspeisung ins Stromnetz kann jedoch nicht länger von einem bisherigen Entscheidungsgrundsatz ausgegangen werden, der sich auf eine Verlegung bzw. Aufteilung des Energiebezugs in entsprechende Haupt- und Nebentarife ausgeprägt hat.

In aktuellen Untersuchungen konnte beispielsweise eine Korrelation zwischen Stromerträgen aus Windenergie und den Preisen im tagaktuellen Stromgroßhandel nachgewiesen werden. Der Ausgangspunkt für ein Ereignis negativer Strompreise wird in zeitweise unerwartet hohen Einspeiseleistungen aus Photovoltaik- und Windkraftanlagen gesehen. In einem zukünftigen Energiesystem mit hohem Anteil fluktuierender Erzeugungs- und Einspeiseleistungen geht der Zusammenhang zwischen saisonalen und tageszeitlichen Randbedingungen und der Entwicklung der Strombezugspreise zurück, so dass anstelle von zeitabhängigen Tarifen eher kostenabhängige Tarife zum Tragen kommen werden.

Um in Zukunft die starren Tarifsysteme abzulösen, müssen Stromlieferanten und Endkunden eine engere Beziehung eingehen. Damit zum Beispiel ein Stromlieferant von der Volatilität an der Strombörse profitieren kann und gleichzeitig in der Lage ist, die Handelsrisiken abzumildern, ist eine stärkere Einbindung von Endkunden erforderlich. Wie in **Abbildung 2** dargestellt, mag eine Koordination und Interaktion zwischen einem Containerterminalbetrieb und verschiedenen Energiewirtschaftsakteuren in nachfolgenden Anwendungs- und Geschäftsfällen interessant sein.

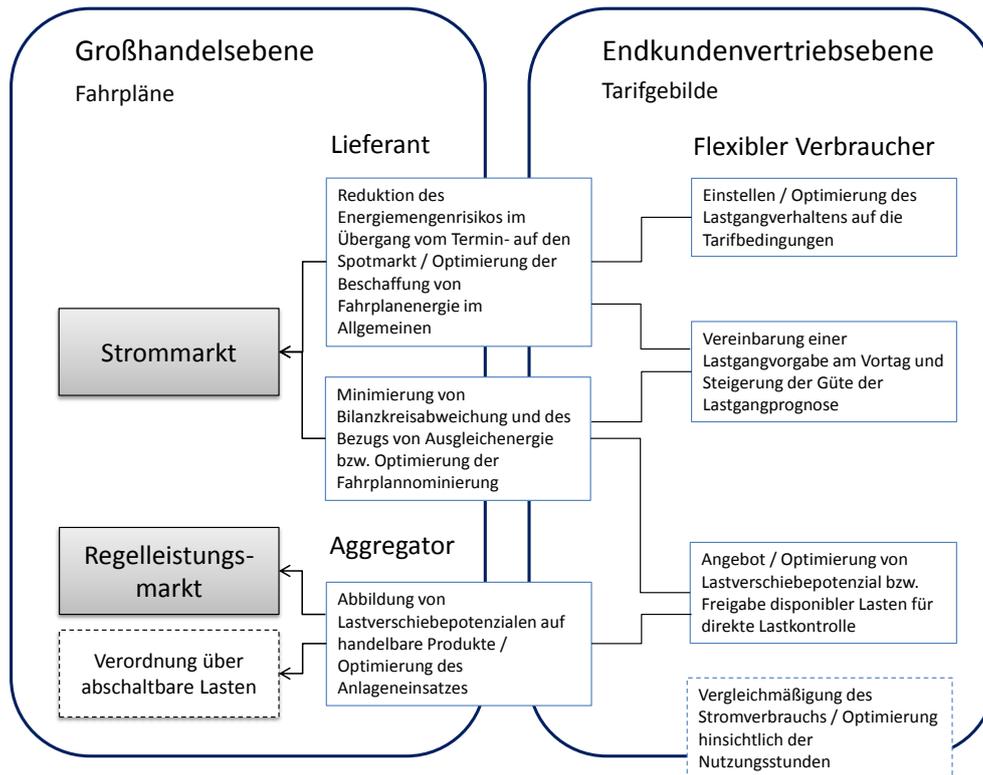


Abbildung 2: Überblick zu energiewirtschaftlichen Handlungsfeldern bei der Nutzung und Vermarktung von Flexibilität der Nachfrageseite

2.1.1.1 Zusicherung bestimmten Lastgangverhaltens bzw. Abfahren von Energiebedarfsprognosen

Der Containerterminalbetreiber hat die Möglichkeit, das eigene Abnahmeverhalten auf die zwischen ihm und einem Stromlieferanten vereinbarten Tarifbedingungen einzustellen. Dies bedeutet zum Beispiel, den Stromverbrauch in der Aufteilung auf einen Haupt- und Nebentarif zu optimieren. Natürlich wünscht sich ein Stromlieferant, dass sich der flexible Verbraucher in der Weise auf das Tarifgebilde – sei es eine Kombination von tageszeit- oder lastabhängigen Tarifmerkmalen – einstellt, dass sich sein Lastgangverhalten wiederholt und es sich statistisch besser abschätzen lässt. Wenn sich das Abnahmeverhalten seines flexiblen Endkunden als langfristig stabil annehmen lässt, hat der Stromlieferant die Möglichkeit, sich recht frühzeitig an den Terminmärkten einzudecken. Für den Stromlieferanten wird das Energiemengenrisiko im Übergang vom langfristigen zum kurzfristigen Handel auf den Wirkleistungsmärkten reduziert. Der Containerterminalbetreiber kann den Lieferanten bei der passgenauen Beschaffung von Energiemengen unterstützen, indem er überhaupt Lastganginformationen zur Verfügung stellt. Je nachdem wie weit die Vorhersagefunktionalitäten reichen, kann die Lastganglinie einer einzelnen Verbrauchsgruppe oder auch die Gesamlastganglinie ermittelt und übertragen werden. Der Lieferant nimmt eine Lastganglinie von seinem Endkunden gerne entgegen, um besser über das Abnahmeverhalten informiert zu sein. Die Informationen von Endkundenseite sind wertvoll für den Lieferanten, da es ansonsten nur statistische Ansätze zur Einschätzung des Abnahmeverhaltens aus der eingeschränkten Perspektive des Lieferanten gibt. Bei einem Containerterminalbetrieb können sich gegenüber solchen statistischen Einschätzungen, die allein auf der Grundlage von Zählerdaten bzw. einer registrierenden Leistungsmessung getroffen werden, gravierende Abweichungen ergeben. Die Auslastungssituation bei einem Containerterminalbetrieb kann sich innerhalb eines Tages so bedeutend ändern, dass im Grunde nur aus der Endkundenperspektive beispielsweise anhand von Schiffsankunfts- oder davon abgeleiteten Auslastungsinformationen ausgesagt werden kann, ob statistische Einschätzungen zum jeweiligen Tag zutreffend sind oder nicht. Der Containerterminalbetreiber hat die Möglichkeit, beim Stromlieferanten ein bestimmtes Abnahmeverhalten durch Lastganginformationen voranzukündigen und die Prognosegüte unter Kenntnis verbrauchsrelevanter Einflüsse drastisch zu steigern. Eine ge-

nauere Einhaltung von Energiebedarfsprognosen bzw. ein schmaleres Toleranzband für Prognoseabweichungen verspricht Vergünstigungen im Energieeinkauf. Die Verpflichtung zu einem festen Lastgangverlauf seitens des Containerterminalbetreibers nimmt dem Stromlieferanten die Prognoseunsicherheit hinsichtlich der Fahrplannominierung aus der Bilanzkreisverantwortung heraus.

2.1.1.2 Dynamische Bepreisung des Strombezugs im Zusammenhang mit dem Laden von Wechselbatterien

Durch eine Energieautomation kann eine Optimierung des Wirkleistungsbezugs einsetzen, die variable Bezugspreise berücksichtigt und nicht bloß die Anlagenverbräuche beispielsweise zwischen Haupt- und Nebentarif jongliert. Durch die wenig planbaren, sondern bestenfalls gut prognostizierbaren Energieerträge aus erneuerbarer Energiequellen ergibt sich ein Mehr an Volatilität bei den Strompreisen im börslichen Handel. Indem der Containerterminalbetreiber auf eine dynamische Bepreisung eingeht, hilft er dem Stromlieferanten die Strompreisentwicklung zu arbitrieren und von Strompreisschwankungen zu profitieren. Der Containerterminalbetreiber hat die Möglichkeit, Lastverschiebepotenziale auf ein Marktpreissignal hin zu optimieren und sie dem Stromlieferanten anzubieten. Gegebenenfalls kann er ohne Eingriff in den Logistikprozess sogar die Betriebsabläufe im Zuge von Planungen derart einrichten, dass zu einem gewünschten Zeitabschnitt das Potenzial zu- oder abschaltbarer Verbrauchsgeräte maximiert wird. Der Stromlieferant kann auf diese auf Grundlage eines Ablaufplans zusicherbaren Lastverschiebepotenziale am Vortag zurückgreifen, um sich für einträgliche Handelsgeschäfte in Stellung zu bringen. Der Stromlieferant würde ausgewählte Lastverschiebeprodukte gegenüber dem Containerterminalbetreiber quittieren können, weshalb es aus der Sicht des Stromlieferanten wie zwei untrennbar miteinander verbundene Optionen im Stromhandel funktioniert. Ein Lastverschiebeprodukt besteht darin, den Verbrauch zu einem Viertelstundenintervall erhöhen oder reduzieren zu können, was zu einem späteren Viertelstundenintervall daran geknüpft ist, den Verbrauch entgegengesetzt reduzieren oder erhöhen zu müssen. Die Freigabe einer disponiblen Last würde sich in einem Zeitintervall zur Reduktion des Verbrauchs wie eine Kaufoption und umgekehrt im anderen Zeitintervall zur Erhöhung des Verbrauchs wie eine Verkaufsoption auswirken.

2.1.1.3 Angebot von Ausgleichsleistung an den Stromlieferanten in Bilanzkreisverantwortung

Mit einer grundsätzlichen Flexibilität der Ladeleistung oder Möglichkeiten zu einer zeitweisen Reorganisation der Logistiksysteme kann dem Stromlieferanten eine Ausgleichsleistung angeboten werden. Wenn bereits zwischen Containerterminalbetreiber und Stromlieferant ein fahrplanmäßiges Verbrauchsverhalten festgelegt wurde, können vom Stromlieferanten im Rückgriff auf disponible Lasten gezielt Veränderungen an der Lastgangkurve des Containerterminalbetriebs vorgenommen werden. Dies mag sich anbieten, um zum Beispiel eine bei einem anderen leistungsbemessenen Endkunden des Stromlieferanten registrierte Prognoseabweichung zu entschärfen, noch ehe eine Fahrplanneuanmeldung für den Bilanzkreis erfolgen kann. Der Stromlieferant hat die Möglichkeit, Abweichungen von dem für den Bilanzkreis nominierten Fahrplan einzudämmen und somit in der Bilanzkreisverantwortung eine geringere Menge an Ausgleichenergie abgerechnet zu bekommen.

2.1.1.4 Angebot von Regelleistung an einen Regelzonenverantwortlichen

Ein Aggregator kann die vom Containerterminalbetreiber angebotenen Lastverschiebeprodukte zusammen mit den Anpassungsmöglichkeiten anderer Erzeugungs- und Verbrauchsstellen auf die Regelleistungsmarkt handelbaren Produkte abbilden. Durch die Bündelung mehrerer Erzeugungs- und Verbrauchsstellen können zum einen Flexibilität zusammengesetzt werden, so dass eine Regelleistung einer höheren Qualitätsstufe daraus hervorgeht. Zum anderen wird durch die geeignete Auswahl von Erzeugungs- und Verbrauchsstellen abgesichert, dass die am Regelleistungsmarkt platzierte Angebotsmenge im Falle eines Abrufs tatsächlich erbracht werden kann. Einzelne Anlagen können innerhalb des Pools einander ablösen, um einen größeren Erbringungszeitraum abzudecken zu können.

2.1.2 Prozessmodellierung für Planung und Vermarktung sowie Ausführung und Abruf

Die ausgesuchten Geschäfts/Anwendungsfälle erforderten neben dem Prozess der Ablaufplanung und Vermarktung von Flexibilität auch den Prozess der Ausführung von Ablaufplänen unter Abrufen von extern. Über die Modellierungssprache BPMN (Business Process Model and Notation) konnten die beteiligten Teilsysteme aus den Rechnerumgebungen der Projektpartner, mit dort zur Verfügung gestellten Anwendungskomponenten und die Prozessschritte bei der Ablaufplanung (einschließlich Vermarktung) sowie der Planausführung (mit Abrufen) erfasst werden.

Die **Abbildung 3** enthält ein Prozessschaubild für die energiewirtschaftliche Planung der Elektrizitätsbereitstellung an die batterie-elektrischen Fahrzeuge und anschließende Vermarktung von Flexibilität. Im besten Wissen um die betrieblichen Erfordernisse wird die Flexibilität für ein Angebot von Minutenreserve oder auch den kurzfristigen Stromhandel einen Tag vor der eigentlichen Lieferung bestimmt. Die zu erwartende Transportlast wird über Schiffsankunftspläne, genauer genommen die darin enthaltenen Liegezeiten und annotierten Anzahlen von Import- und Exportcontainern (vom TOS) ermittelt. Zusammen mit der Ladezustandsverteilung innerhalb der Fahrzeugflotte und der Station wird eine Bedarfsprognose für das Aufladen der Wechselbatterien erstellt (EMS-TS2), die in die Festlegung von einzelnen Ladeverläufen für die Ladestellen münden. Aus der so erhaltenen Verbrauchsprognose werden die Vermarktungspotentiale für Day-Ahead und Minutenreserve ermittelt und an den entsprechenden Märkten vermarktet (EXT). Das Ergebnis wird am Abend an das betriebliche Lastmanagement (EMS-TS2) übermittelt, das auf dieser Grundlage dedizierte Ladefahrpläne für den nächsten Tag erstellt.

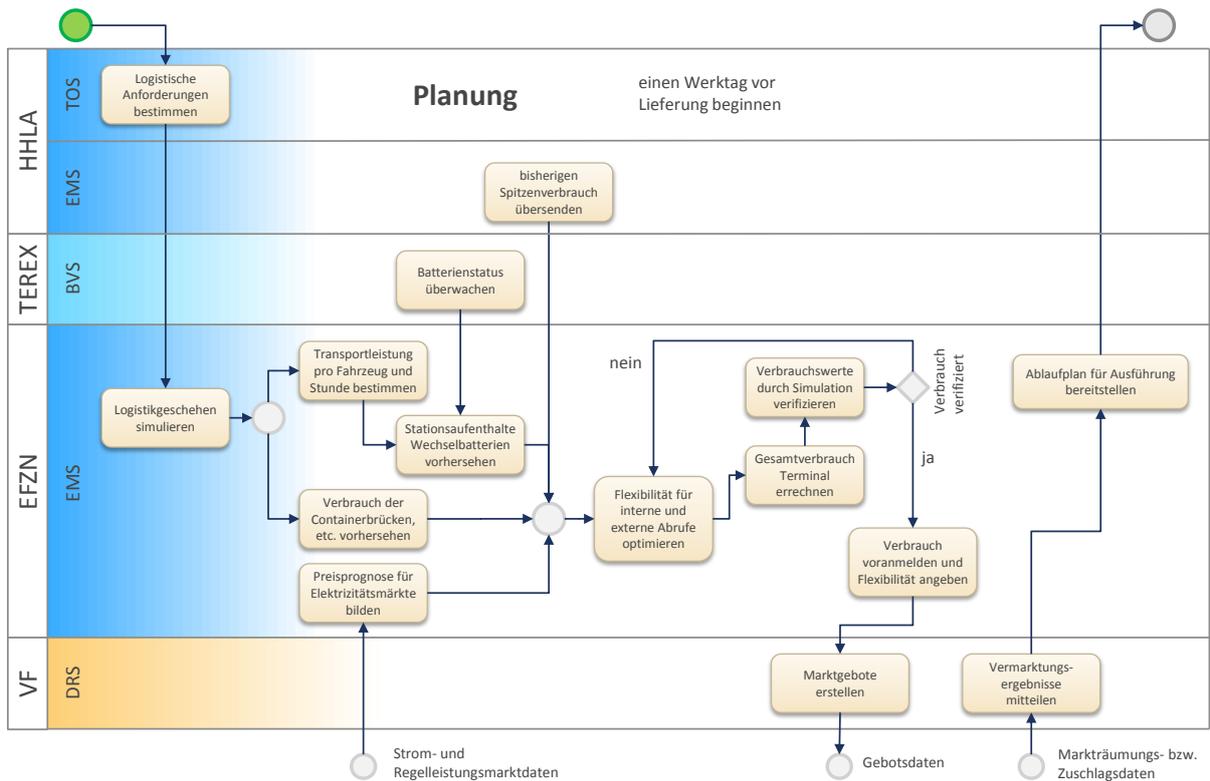


Abbildung 3: Prozessmodellierung der Ablaufplanung und Vermarktung

Die Abbildung 4 enthält ein Prozessschaubild für die Ausführung eines Ablaufplans unter Abrufen von extern.

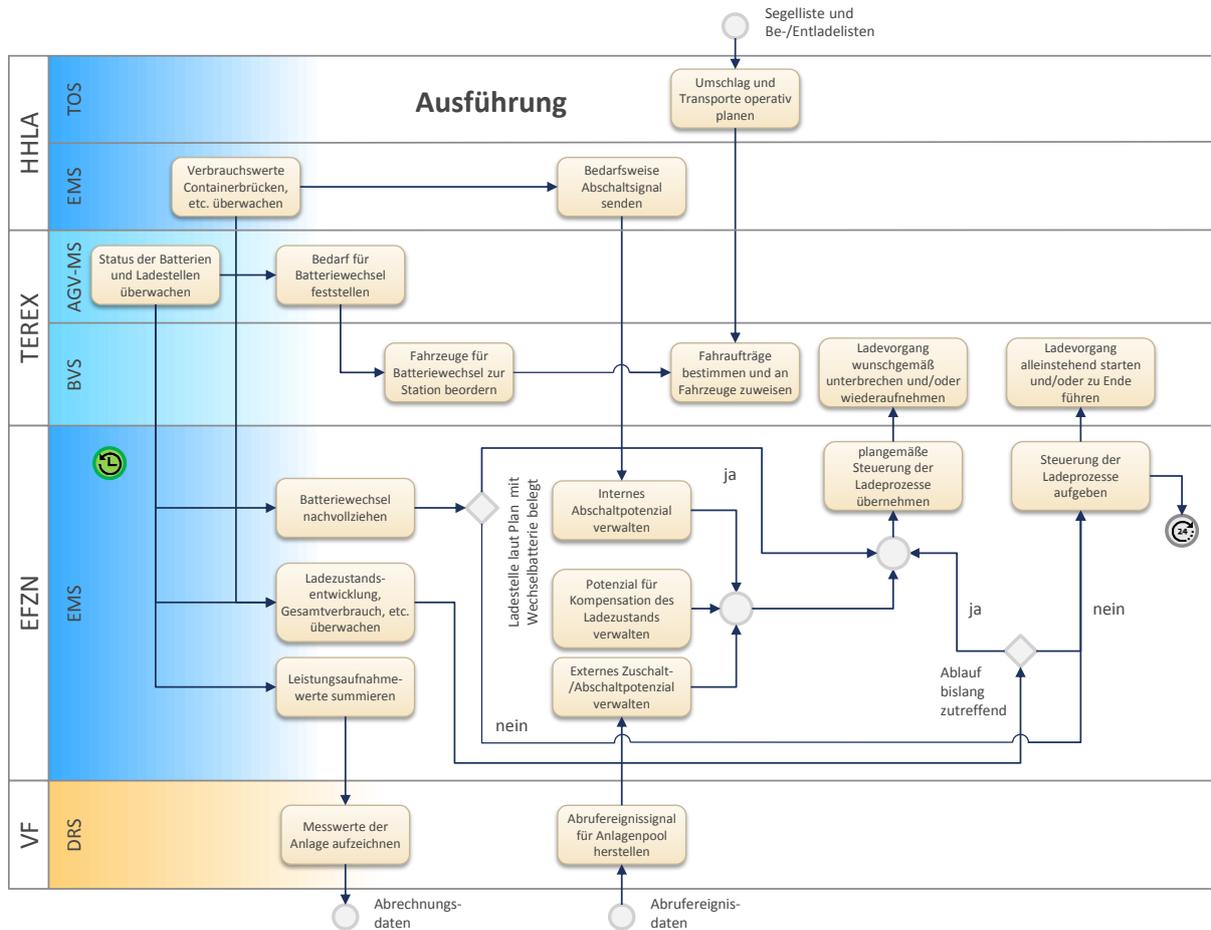


Abbildung 4: Prozessmodellierung der Planausführung mit Abrufen von extern.

Die einzelnen Prozessschritte im BPNM-Diagramm wurden nach dem in Tabelle 1 wiedergegebenen Muster beschrieben. Sie wurden hinsichtlich des Zusammenwirkens der Anwendungskomponenten entlang der Werkzeugkette und den Vor- und Nachbedingungen sowie ihrer Ein-/Ausgabedaten im Detail beschrieben.

Tabelle 1: Vorlage zur Beschreibung der Prozessschritte aus der Modellierung mit BPNM

Name des Prozesses	Austausch Messdaten
Prozessziel	Überwachung und Überprüfung der Leistungsbereitstellung, die durch einen Abruf eingefordert wird. Gleichzeitig die Bewertung der Anlage im zugehörigen Pool.
Beschreibung	Die aktuelle Verbrauchsleistung der Ladestation wird in einem Minutenintervall an die Aggregationsplattform übermittelt. Daraus kann einerseits – auch kurzfristig – die Verfügbarkeit der Anlage bewertet werden und andererseits dient es zur Dokumentation der abgerufenen Leistung bei einem Abruf von Regelenergie.
Vorbedingung	Die einzelnen Leistungsaufnahmewerte liegen dem EMS als Information zu den Ladestellen vom BVS vor und können aufsummiert werden
Nachbedingung	
Eingabe:	fortlaufende Summenwerte der Leistungsaufnahme der Ladestation im Containerterminal
Ausgabe:	
Beteiligte Komponenten	DRS, EMS
Fehlerfall	Werden keine Daten geliefert, muss die Ressource als nicht verfügbar eingestuft werden. Innerhalb des Anlagenpools müssen dann (nach eigener Reihenfolge, Merit Order List, kurz MOL) vom Aggregator übrige Anlagen herangezogen werden, um den Abruf zu realisieren.
Weitere Anforderungen	

Durch die Modellierung der Geschäfts-/Anwendungsfälle und der detaillierten Beschreibung der Prozessschritte waren die Anforderungen an das Demand Response System und die erforderliche Schnittstelle zum betrieblichen Energie-Management-System (EMS-TS2) formuliert. Nach einer Evaluierung unterschiedlicher Standards für den elektronischen Datenaustausch wurde entschieden, die Schnittstelle zwischen den Teilsystemen EMS und DRS entsprechend der Anforderungen mit dem Datenaustauschformat OpenADR zu realisieren.

Für das Demand Response System wurde grundsätzlich auf bestehende Anwendungskomponenten zurückgegriffen. Diese kamen bereits in einem VATTENFALL-internen Projekt „Active Customer Demand Control (ACDC)“ erfolgreich zur Anwendung.

2.1.3 Softwareentwurf auf Grundlage der ERA Referenzarchitektur

Es wurde eine Architektur für die Softwareumgebung zur energiewirtschaftlichen Planung und zur Ausführung/Kontrolle geplanter Batterieeinsätze und des Ladeverlaufs in der Batteriewechselstation entwickelt, die sich an die Umgebung „Flexible Consumer“ der Electricity Market Reference Architecture (ERA) anlehnt.

2.1.3.1 Die ERA-Referenzarchitektur

Die ERA ist eine Software-Architektur ¹, die als Basis für die Entwicklung von Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) zukünftiger Energiesysteme dient. Sie hat ihren Ursprung in dem deutschen Forschungsprojekt *eTelligence*, bei dem ein regional integrierter Elektrizitätsmarkt entworfen und versuchsweise aufgebaut wurde. Die ERA an sich wurde dabei nicht als Grundlage verwendet, sondern im Anschluss daran entworfen, um die Erfahrungen aus den Anwendungsfällen des Projektes *eTelligence* ² auch auf andere Modellregionsprojekte (aus

¹ Appelrath, Beenken, Bischofs & Uslar (Hrsg.). 2012. IT-Architecturentwicklung im Smart Grid: Perspektiven für eine sichere markt- und standardbasierte Integration erneuerbarer Energien.

² eTelligence Konsortium. EWE AG. 2012. Abschlussbericht eTelligence: Neue Energien brauchen neues Denken.

E-Energy – „Smart Grids made in Germany“³) übertragen zu können. ERA basiert auf existierenden konzeptionellen Ansätzen für Smart Grid-Anwendungen wie *IntelliGrid*⁴. Die Architektur, welche sich als Schablone für die Realisierung dezentraler Stromversorgungsnetze sieht, beschreibt dafür die Aufgaben verschiedener Marktrollen und deren Zusammenspiel auf eine abstrakte Art und Weise unabhängig von einer gewählten Technologie für die tatsächliche Implementierung. Die Architektur lässt sich gut mit UML-Komponentendiagramme darstellen. Die UML-Komponenten stellen dabei jeweils eine abgeschlossene Einheit dar, welche bestimmte Systemfunktionalität kapselt. Die grobe Komponentenstruktur orientiert sich dabei an Marktrollen. Jede Marktrolle wird als eine eigene UML-Komponente mit Umgebungsbezeichnung definiert, welche wiederum UML-Komponenten enthält, die jeweils Funktionsblöcke dieser Marktrolle repräsentieren. Die Abhängigkeiten der einzelnen Komponenten werden technologie-unabhängig über Ports beschrieben, die durch entsprechende Schnittstellen zu realisieren sind.

Einem generischen Marktaufbau folgend werden in der ERA die folgenden Umgebungen definiert: *Grid Operator*, *Energy Service Provider*, *Trader*, *Market*. Zusätzlich gibt es die Endpunkte des Netzes repräsentierenden *Producer*, *Consumer* und *Storage*, wobei die ersten beiden sowohl in einer statischen Funktion als auch in einer dynamischen Funktion als *Flexible Producer* und *Flexible Consumer* mit Lastverschiebepotenzial dargestellt werden. Die Komponente *Measurement Service Provider* erhebt, verwaltet und stellt die Messdaten für andere Komponenten zur Verfügung.

2.1.3.2 Die Rolle des Flexible Consumers in der ERA

Die Umgebung *Consumer* repräsentiert in der ERA-Referenzarchitektur einen elektrischen Verbraucher, der eine reine Last darstellt. Dabei ist das Verbrauchsverhalten in sich prognostizierbar oder die Prognosedaten können von externen Komponenten zur Verfügung gestellt werden. Auf Basis solcher Prognosedaten werden die Handelsaktivitäten des *Consumers* darauf ausgerichtet, seinen Verbrauch möglichst ökonomisch am Markt – ggf. durch einen *Energy Service Provider* – zu decken. Der *Flexible Consumer* verfügt im Gegensatz zu dem *Consumer* über steuerbare Verbrauchseinheiten, die unter anderem ein zeitliches Verschieben von Lasten ermöglichen. Als Beispiel für Ausprägungen solcher flexiblen Verbraucher werden sowohl Kühlhäuser von Industriebetrieben als auch elektrische Heizungen von Privathaushalten genannt.

³ Begleitforschung E-Energy. (2012). Smart Energy made in Germany - Zwischenergebnisse der E-Energy-Modellprojekte auf dem Weg zum Internet der Energie.

⁴ THE INTEGRATED ENERGY AND COMMUNICATION SYSTEMS ARCHITECTURE, EPRI, Palo Alto, CA and Electricity Innovation Institute, Palo Alto, CA: 2003

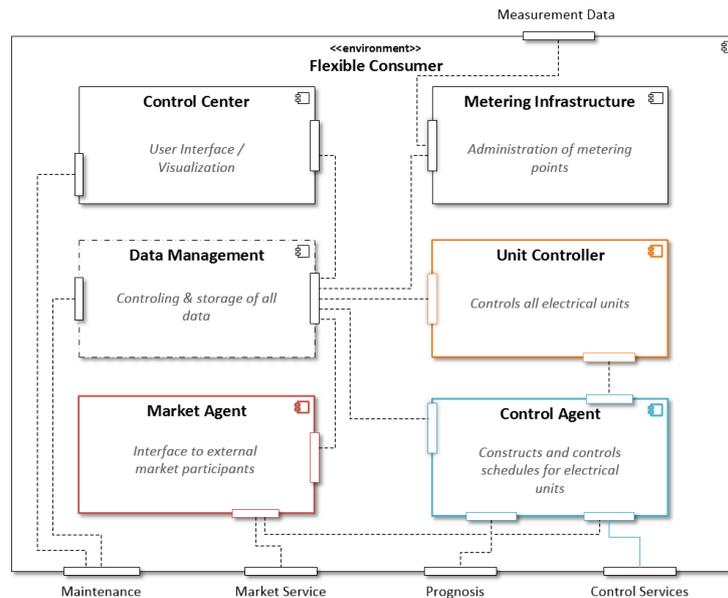


Abbildung 5: Aufbau der Umgebung des Flexible Consumer laut ERA

Wie in **Abbildung 5** zu sehen, besteht die Umgebung *Flexible Consumer* aus den Komponenten *Metering Infrastructure*, *Data Management*, *Unit Controller*, *Market Agent*, *Control Agent* und *Control Center/Visualization*. Die Komponente *Metering Infrastructure* stellt die Messdaten des Verbrauchers zur Verfügung. Diese werden für die Visualisierung und die Abrechnung internen und externen Komponenten zur Verfügung gestellt und im *Data Management* gespeichert. Das *Data Management* dient der zentralen Aufbereitung und Speicherung aller relevanten Daten der Umgebung.

Der *Unit Controller* übernimmt die Steuerung von angeschlossenen Einheiten. Alle angeschlossenen Geräte melden sich zuvor an einem Unit Register an. Diese Komponente ist Teil des *Control Agents*, der neben dem Unit Register auch noch eine Energiemanagement-Komponente zur Erstellung von einheitenübergreifenden Prognosen und Fahrplänen, einem *Control Service* für die Steuerung von externen Zugriffen auf die Einheiten und einem *Controller* für die Umsetzung von vorgegebenen Fahrplänen umfasst.

Eine besondere Aufgabe kommt dem *Market Agent* zu. Er realisiert die Kommunikation und den Handel mit externen Akteuren am Markt. Entsprechend der Anlagenrestriktionen der eigenen Einheiten und der Verfügbarkeit von Zuschalt- und Abschaltpotenzial werden Gebote für Regelleistung platziert oder schlicht Angebote mit Bezugspreiskonditionen eingeholt. Die Komponente *Market Service* als Teil des *Market Agents* übernimmt dabei die Kommunikation nach außen, die Authentifizierung und die Mediation von Anfragen von außen an weitere interne Komponenten. Durch die Komponente *Trading Management* wird in Form möglicher Fahrpläne die Flexibilität festgestellt und verwaltet. In die andere Richtung ist das *Trading Management* auch dafür verantwortlich, sich auf die mit einem Zuschlag versehenen Gebote vom *Market Service* einzurichten und die entsprechenden Fahrpläne umzusetzen. Die Komponente *Clearing* übernimmt Abrechnungsfunktionen.

Der *Market Agent* ist dabei immer in Abstimmung mit dem *Control Agent*. Er verwertet dessen Prognosevorgaben und gibt Rückmeldungen entsprechend der erfolgreichen Interaktion am Markt. Das *Control Center* stellt die Benutzungsoberfläche (*Visualization*) der Gesamtkomponente dar, die aufgeteilt wird in eine *Maintenance*-Komponente für die Wartung, eine *Consulting*-Komponente zur Entscheidungsunterstützung und eine *Feedback*-Komponente zur Anzeige von Status-, Markt- und Messdaten.

2.1.3.3 Die Planung und Steuerung eines Containerterminals mit Elektrofahrzeugen

Eine IKT-Unterstützung für den Containerterminalbetrieb ist für die Planbarkeit des Logistikgeschehens auf der Seeseite sowie des Geschehens für die Elektrizitätsbereitstellung und zum Überschauen der Batteriewechselvorgänge unabdingbar. Um die durch das Batteriewechselkonzept entstehenden Planungsspielräume und die Flexibilität der Ladeprozesse optimal auszunutzen, wurden betriebliche Energiemanagementkonzepte entwickelt. Es wurde in Anlehnung an die ERA eine Software-Architektur entworfen, die unterschiedliche Geschäfts-/Anwendungsfälle rund um die Vorhersage und Voranmeldung des Viertelstundenverbrauchs des Containerterminalbetriebs, die Planung von Ladeprozessen und der damit verbundenen Zuschalt-/Abschaltpotenziale sowie die Vermarktung nützlicher zeitlicher Lastverschiebepotenziale abdeckt. Im konzeptionellen Kern besteht diese aus den in Abbildung 6 dargestellten drei Komponenten *Logistics Simulation*, *Energy Demand Optimization* und *Energy Controller*.

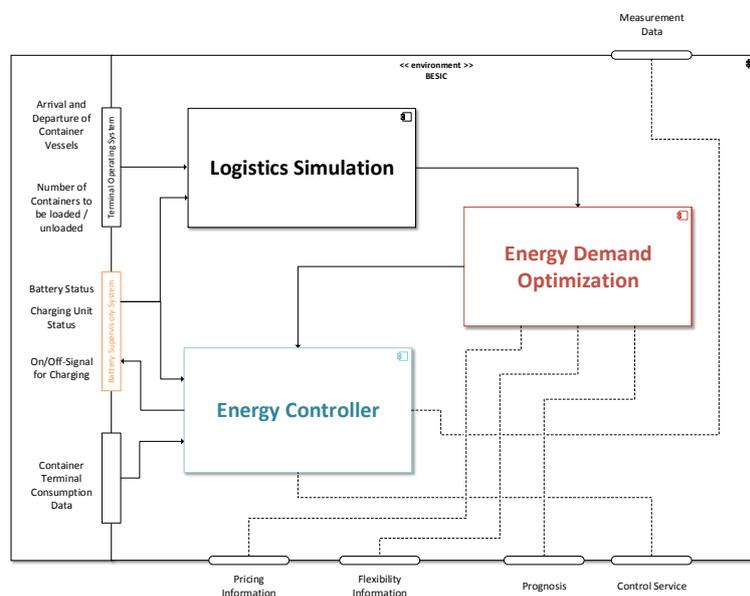


Abbildung 6: Auszug aus dem Architekturdrawing mit neuartigen IKT-Komponenten für die Planung und Steuerung von Elektrofahrzeugen im Containerterminalbetrieb unter energiewirtschaftlichen Aspekten (oberste Ebene)

Die Komponente *Logistics Simulation* dient der Prognose der logistischen Abläufe und leitet daraus sowohl den Gesamtenergiebedarf des Terminals ab als auch die Intensität des Logistikgeschehens bzw. wie viel Transportleistung im Verlauf der Zeit erforderlich ist. Eine vollständige Simulation der seeseitigen Abläufe im Containerterminal wird benötigt, da die Umschlags- und Transportprozesse hochdynamisch sind und in erster Linie von der sich täglich ändernden Liegeplatzbelegung bzw. den geplanten Schiffsankünften und dem damit verbundenen Containeraufkommen abhängen. Zudem sind die Batteriewechselzeitpunkte weitestgehend von der individuellen Fahrleistung der Transportfahrzeuge abhängig. Die Simulationskomponente bildet das Containerterminal mit drei hauptsächlichen Funktionsbereichen der Containerbrücken, des Horizontaltransports zwischen Kai-mauer und Lager sowie den Blocklagern auf der Seeseite vollständig ab. Es werden die logistischen Abläufe simuliert und der damit verbundene Energiebedarf aufgezeichnet. Zusätzlich werden überwiegend statische Verbräuche wie Beleuchtung, Bedarf der Verwaltungsgebäude oder auch der Hinterlandanbindung dazu gerechnet, so dass der Gesamtverbrauch des Terminals bestimmt und daraus für den nächsten Tag eine Lastgangvorhersage erstellt werden kann.

Die Komponente *Energy Demand Optimization* übernimmt den so gebildeten Lastgang und die für einzelne Transportfahrzeuge vorgesehenen Auftragsprogramme aus der Simulation, um darauf aufbauend im Groben den Batterieeinsatz und im Detail den Verlauf der Ladeprozesse für den Strombezug und das Angebot von Minuten-

reserve optimierend zu planen. Dazu verwendet sie Preisinformationen für den Stromgroßhandel sowie die am Minutenreservemarkt handelbaren Produkte. Es gilt hierbei stets die Prämisse, dass durch die geplante Elektrizitätsbereitstellung die logistischen Prozesse nicht beeinträchtigt und auch nicht bisher erreichte Spitzenverbrauchswerte des Terminals insgesamt überschritten werden. Deshalb empfiehlt es sich, Planungsergebnisse anschließend noch einmal mit Hilfe von Simulation zu verifizieren. Daneben gibt es weitere Komponenten, die diese Ablaufoptimierung unterstützen und im sogenannten *Energy Controller* zusammengefasst werden. Sie übernehmen als Schnittstellenkomponenten die Kommunikation mit Marktpartnern und den angeschlossenen energetischen Einheiten und überwachen die Ausführung energiewirtschaftlich optimierter Ablaufpläne für den Containerterminalbetrieb. Bei Erkennung eines unerwarteten Ereignisses bzw. Feststellung bedeutender Abweichung zwischen Plan- und Ist-Werten (zum Beispiel bei der Überwachung der Batterieladezustände) wird die optimierte Planung verworfen und zu den standardmäßigen, durch die Feldsteuerung in der Batteriewechselstation reglementierten Ladeprozessen (Ladeprozesse werden sofort gestartet und so rasch wie möglich zu Ende geführt) zurückgekehrt.

2.1.3.4 Die eigene Softwarearchitektur im Kontext der ERA

Im Anwendungskonzept zur Planung und Steuerung der Energiebereitstellung für die Containertransporter finden sich alle Komponenten des *Flexible Consumers* der Referenzarchitektur wieder, auch wenn einige Unterschiede benannt werden können. Es wurde ein besonderer Fokus auf die Konzeption des *Control Agents* gelegt, dessen Referenzfunktionen über die gesamte Architektur verteilt zu finden sind. Insbesondere die Kernkomponenten *Logistics Simulation* und *Energy Demand Optimization* werden in der Referenz zusammen als *Energy Management System* betrachtet, während sie hier konzeptionell auch logisch voneinander getrennt sind und rein funktional verschiedene Aufgaben übernehmen. Das Anwendungskonzept sieht außerdem die Einbindung eines lokalen Energiedatenmanagementsystems vor, welches im Terminal heute vornehmlich für den internen Messstellenbetrieb und zukünftig das Spitzenlastmanagement verantwortlich ist. Insofern ist es funktional eher auf die Komponente *Metering Infrastructure* abzubilden als auf die namensähnliche Komponente *Energy Management System* der Referenzarchitektur. Der *Market Agent* der Referenzarchitektur wird im eigenen Anwendungskonzept durch die Komponente *Economic Utilization* repräsentiert; allerdings übernimmt die *Energy Demand Optimization* auch die ökonomische Bewertung verschiedener Fahrplanvarianten, so dass vorher genannte *Economic Utilization* auf die Verhandlung/Vermittlung mit externen Marktpartnern reduziert ist.

2.1.4 Evaluierung verschiedener Standards für den Datenaustausch

Seit Beginn der Liberalisierung des Energiemarktes zeigt sich eine deutliche Zunahme der Marktfunktionen, die in der Energiewirtschaft zu erfüllen sind. Insbesondere regulierte Massenprozesse wie Lieferantenwechsel oder Messdatenübermittlung zwangen die beteiligten Marktakteure schon früh standardisierte Nachrichtenprotokolle für die automatisierte Abwicklung dieser Prozesse zu entwickeln. Für diese Prozesse, die für den deutschen Strommarkt in den Verordnungen GPKE (Geschäftsprozessen zur Belieferung von Kunden mit Elektrizität), MaBiS (Markregeln für die Durchführung der Bilanzkreisabrechnung Strom) und WiM (Wechselprozesse im Messwesen) beschrieben sind, hat sich derzeit eine Anzahl von Nachrichtentypen basierend auf dem Kommunikationsstandard *EDIFACT* etabliert. Diese werden im deutschen Energiemarkt intensiv genutzt und regelmäßig von den Verbänden gepflegt und bei Bedarf angepasst. Wichtigster Nachrichtentyp ist hier *MSCONS*, der für den Versand von Zählerständen und Lastganginformationen genutzt wird.

Für nicht-regulierte Prozesse der Energiewirtschaft ist der Druck für einen hohen Grad der Standardisierung gestiegen, insbesondere durch das Aufkommen der „Smart Grids“, d.h. mit einer Dezentralisierung der Erzeugung in Kombination mit fluktuierender Einspeisung und der höheren Verfügbarkeit von Messwerten („Smart Meter“) sowie vermehrter Einbindung der Endkunden für den Zweck der Nachfragesteuerung („Demand

Response“). Eine Anzahl von verschiedenen Formaten wurde bereits von verschiedenen Marktakteuren und Standardisierungsgremien erarbeitet und vorgeschlagen. Diese Formate unterscheiden sich in den unterstützten Zielprozessen (z.B. Netzautomatisierung, Smart Meter Steuerung, Endkundenbeeinflussung, etc.), der Ebene der Beschreibung (Datenmodell, Datenaustauschprotokoll, etc.), Verantwortlichkeit für das jeweilige Format (Energemarktakteur, Verband, Standardisierungsgremium, etc.), sowie der derzeitigen Marktdurchdringung. Die prominentesten Formate sollen im Folgenden kurz skizziert und anschließend bewertet werden.

Das von verschiedenen europäischen Akteuren getriebene *Open Smart Grid Protocol*⁵ ist ein Nachrichtenprotokoll für die Kommunikation von Messstellenbetreibern und Messdienstleistern mit Smart Metern. Die für Konfiguration der Endgeräte und dem Abruf von Messergebnissen benötigten Daten sind dabei in Tabellen abgelegt und können über ein binäres Format versendet werden. Im Standard sind die dafür benötigten Tabellen ebenso beschrieben, wie die zu erfüllenden Voraussetzungen für die Übertragung über PowerLine.

Das *Common Information Model (CIM)*⁶ ist ein Datenmodell zur Beschreibung von Elektrizitätsnetzen, welches nach und nach auch um Marktprozesse erweitert wurde und inzwischen auch von dem europäischen Verband der Transportnetzbetreiber ENTSO-E in der Entwicklung unterstützt wird. CIM beschreibt dabei in einem objektorientierten Aufbau mittels UML-Klassendiagrammen Bestandteile von Netzen und Marktprozessen und deren Verbindung untereinander. Aus dem sehr umfangreichen Datenmodell können für eigene Zwecke Ausschnitte gewählt werden (sogenannte Profile), die für den jeweiligen Anwendungskontext relevant sind. Serialisiert, z.B. in einer XML-Darstellung, können diese Profile als Nachrichtenformat genutzt werden.

Aus der Erkenntnis heraus, dass es dem CIM noch an Möglichkeiten zur Beschreibung von Prozessen rund um Endkundenflexibilität mangelt, wurde im Rahmen des EU-Projekts MIRABEL eine Erweiterung des Common Information Models vorgeschlagen, welches Datenmodelle für den Austausch von Flexibilitätsinformationen ergänzt („*FlexOffer*“⁷).

*OpenADR*⁸ ist ein Datenaustauschformat welches für die Beeinflussung der Endkundenseite durch Preissignale entwickelt wurde und dabei ist sich in der Version 2.0 im US-amerikanischen Raum durchzusetzen. In einer XML-Notation werden Nachrichten vom Typ Event oder Report genutzt, um Demand Response Ereignisse wie preisliche Varianzen oder geforderte Verbrauchsreduzierungen anzukündigen bzw. nach erfolgten Ereignissen entsprechende Messdaten abzurufen. Es ist jederzeit möglich, die Verfügbarkeit oder auch Nichtverfügbarkeit einer Anlage ad hoc anzuzeigen. Es wird dabei sowohl die Nachrichtenstruktur als auch die Interaktionsfolge in einem Top-Down Ansatz bestehend aus sogenannten virtuellen Endknoten (Virtual End Nodes, VEN) und jeweils übergeordneten Knoten (Virtual Top Nodes, VTN) beschrieben. Dabei kann eine VEN auch wieder eine VTN sein, sollte sie weitere VENs ansteuern können: verschiedene Kommunikationsarchitekturen sind möglich (Herberg, Mashima, Jetcheva, & Mirzazad-Barijough, 2014).

*VHP-Ready*⁹ ist ein Nachrichtenprotokoll für die Steuerung von Blockheizkraftwerken und Wärmepumpen, welches dazu genutzt werden kann, diese zu einem vernetzten, flexibel regelbaren und zentral gesteuerten Anla-

⁵ OSGP Alliance. (2012). Open Smart Grid Protocol.

⁶ International Electrical Commission. (2012). Common Information Model - IEC 61968 Energy Management / IEC 61970 Distribution Management / IEC 62325 Market Extensions

⁷ MIRABEL Consortium. (2011). Micro-Request-Based Aggregation, Forecasting and Scheduling of Energy Demand, Supply and Distribution. MIRABEL-ONE: Initial Draft of the MIRABEL Standard

⁸ OpenADR Alliance. (2013). OpenADR 2.0 b profile specification.

⁹ Vattenfall Europe Wärme AG. (2014). VHPReady – Technische Anforderungsspezifikation.

gensystem im Sinne eines virtuellen Kraftwerkes zusammen zu schließen. Dazu werden unter anderem Schaltbefehle an die Endgeräte kommuniziert. Es wird die Nachrichtenstruktur, für welche die Standards IEC 60870 oder IEC 61850 genutzt werden können, beschrieben und teilweise Interaktionsfolgen vorgegeben.

Tabelle 2 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die einzelnen Formate und benennt neben der verantwortlichen Organisation für die Weiterentwicklung des Standards das hauptsächlich spezifizierte Einsatzgebiet, soweit dieses aus der Spezifikation hervorgeht. Aus dem spezifizierten Einsatzgebiet und dem vorgesehenen Verwendungszweck ergeben sich verschiedene Ebenen, auf denen die Beschreibung und Modellierung erfolgt. Die jeweilige Einordnung, wie sie für die Betrachtung im Projekt BESIC erfolgt ist, ist ebenfalls in dieser Tabelle abgebildet.

Tabelle 2: Überblick über Eigenschaften der einzelnen Datenformate

Format	Herkunft	Treiber	Spezifiziertes Einsatzgebiet	Beschreibungsebene
EDIFACT	International/ Deutschland	CEFACT / BDEW	Regulierte Energiemarktprozesse	Nachrichtenstruktur und Interaktion (Segmente)
OSGP	Europa	OSGP Alliance	Smart Metering	Nachrichtenstruktur & Interaktion (tabellenorientiert)
CIM	International	IEC	Beschreibung von Netztopologien und Energiemarktprozessen	Datenmodell (objektorientiert)
FlexOffer	Europa	-	Handel von Flexibilität von Erzeugungs- und Verbrauchsseite	Datenmodell (objektorientiert)
OpenADR	USA	OpenADR Alliance	Demand Response	Nachrichtenstruktur & teilweise Interaktion (objektorientiert)
VHP-Ready	Deutschland	VHPready e.V.	Fernsteuerung von BHKW und Wärmepumpen	Nachrichtenstruktur (Signalbeschreibung)

Die einzelnen Datenaustauschformate unterscheiden sich hinsichtlich Ihrer Anwendungsfälle, für die sie erstellt worden sind, der Darstellungsebene und der Übertragungsebene. Während einige Formate genau auf ihre Anwendungsfälle zugeschnitten sind, für die sie erstellt wurden (z.B. OSGP, VHP-Ready) sind andere als Datenmodell eher geeignet eine Auswahl aus dem Modell zur Definition eines eigenen Formats zu treffen (CIM). Die wichtigsten Ergebnisse der Evaluation sollen im Folgenden kurz zusammengefasst dargestellt werden. Dabei war ein wichtiges Ziel einen Formatstandard zu finden, der ohne tiefgreifende Änderungen anwendbar ist, praktikabel in der Umsetzung und zukunftsträchtig erschien.

Die derzeitige Nutzung der *EDIFACT*-Nachrichtentypen ist sehr eng mit den regulierten Energiemarktprozessen verbunden. Da die BESIC-Anforderungen aus den betrachteten Datenverkehren aus einem nicht regulierten Bereich kommen, wäre hier eine deutliche Erweiterung bzw. eine umfassende Anpassung bezüglich vorhandener Codierungen nötig, so dass EDIFACT nur sehr bedingt zum Erfüllen der Anforderungen geeignet ist.

Als umfassendes Datenmodell zur Beschreibung von Elektrizitätsnetzen und Energiemarktprozessen bietet die Normenfamilie *CIM* eine breite Basis zur Auswahl benötigter Elemente zur Beschreibung der genannten Anforderungen. Die Auswahl der benötigten Objekte und deren Zusammenstellung als Subset wird Profilbildung genannt. CIM eignet sich damit gut zur Erfüllung der Anforderungen, benötigte Elemente sind zum überwiegenden Teil im Datenmodell enthalten. Es muss allerdings beachtet werden, dass die Profilbildung innerhalb von CIM eine Definition eines eigenen Datenformats (basierend auf einem standardisierten Datenmodell) darstellt und Einschränkungen der Wertebereiche einzelner Datenfelder noch zu definieren wären.

MIRABEL FlexOffer ist eine Erweiterung des CIM-Datenmodells zur Darstellung von Flexibilität sowohl im Erzeugungsbereich als auch auf Verbraucherseite. Es stellt insoweit eine Besonderheit dar, als das es ein Format ist, welches im Rahmen eines Forschungsprojektes entwickelt wurde. Da FlexOffer speziell für den Anwendungszweck Flexibilitätshandel erstellt wurde, deckt es entsprechende Anforderungen an den Versand von Flexibilitätsinformationen ab, ist allerdings auch auf diesen Bereich eingeschränkt und eignet sich allein nicht für die Übermittlung von Preisinformationen oder Lastgangvorhersagedaten. Zusätzlich weicht das Format in der eigentlichen Nachrichtenmodellierung von den Vorgaben von CIM ab, indem es ein eigenes Schema nur mit den eigenen modellierten Datentypen für den Nachrichtenaustausch definiert.

Hinsichtlich der Anforderungen erfüllt *OpenADR* den Großteil derer, die innerhalb des BESIC-Projekts benannt wurden und bietet eine hohe Flexibilität bei der Umsetzung dieser, aber auch weiterer Anforderungen. Insbesondere die Unabhängigkeit der Übertragung zwischen den externen Lieferant/Aggregator und dem Endkunden ist hervorzuheben. Die schaltbaren Einheiten können über Energiemanagementsystems gekapselt werden. Wie die eigentlichen Schalthandlungen an die betroffenen Geräte übertragen werden oder wie viele einzelne Geräte angesprochen werden, bleibt unabhängig vom Informationsaustausch zwischen Lieferanten und Endkunden. Dass das Format im US-amerikanischen Raum bereits erfolgreich im Einsatz ist, spricht ebenfalls für das Format.

Das *Open Smart Grid Protocol (OSGP)* wurde für die PowerLine-basierte Kommunikation mit Smart Metern entwickelt. Dafür wurde ein umfangreiches tabellenbasiertes Datenmodell entworfen, welches genau auf diesen Zweck ausgelegt ist. Lastgangdaten können angefragt und versendet werden. Weder preisliche Informationen noch Informationen bezüglich Flexibilität oder Prognosedaten sind zum Versenden vorgesehen. Zwar gibt es einige Tabellen, die für die herstellerabhängige Verwendung vorgehalten werden und für die es somit keine Vorgaben bezüglich der enthaltenen Daten gibt, allerdings müssten alle Felder selbst definiert werden, sollte man die tabellenbasierte Darstellung nutzen wollen.

VHP-Ready ist ein Standard, der für die Steuerung von BHKWs und Wärmepumpen im Rahmen von virtuellen Kraftwerken entwickelt wurde. Entsprechend ist der Funktionsumfang derzeit noch darauf eingeschränkt. Entsprechende Kompatibilitätslisten für die Kombination verschiedener Anlagearten die steuerbar sind, gibt der Standard vor. Zwar gibt es innerhalb der dargestellten Daten Möglichkeiten zur Abfrage von Verbrauchsdaten und zur Steuerung der Anlagen im Sinne eines Fahrplans, allerdings werden diese Daten nicht als Profil gesendet, was deren Verwendung bezüglich der Anforderungen wieder einschränkt. Preis und Flexibilitätsdaten können mit der heute aktuellen Version des Standards nicht versendet werden. Die Kommunikation erfolgt direkt mit den zu schaltenden Endgeräten.

Die Möglichkeit zur Umsetzung der in dem vorhergehenden Kapitel genannten Anforderungen wurde für jedes Format geprüft, soweit es die öffentlich verfügbare Dokumentation zuließ und diese für den Projektkontext sinnvoll erschien. Tabelle 3 fasst die Bewertung für die wichtigsten Anforderungen noch einmal im Überblick zusammen.

Tabelle 3: Bewertung von Kommunikationsstandards bezüglich der Erfüllung der einzelnen Anforderung des BESIC-Projekts

-  Anforderung vom Standard direkt abgedeckt  Erhebliche Anpassungen des Standards benötigt
 Anforderung vom Standard abdeckbar  Derzeit mit dem Standard nicht abbildbar
 Ergänzungen zum Standard benötigt

Format	Preis- informationen	Lastgang- prognosedaten	Flexibilitäts- angebot	Flexibilitäts- abruf	Verfügbarkeit	Messdaten
EDIFACT						
CIM						
FlexOffer			 			
OpenADR	 				 	
VHP-Ready						
OSGP						 

Auf Basis der in der Evaluation erfolgten Bewertung wurde für das BESIC-Projekt die Nutzung von OpenADR empfohlen. Insbesondere die Möglichkeit zur modifikationsfreien Umsetzung aller Anforderungen und die freie Verfügbarkeit von Referenzimplementierungen gaben hier den Ausschlag. Die weiteren Formate EDIFACT, VHP-Ready und OSGP sind derzeit noch zu sehr auf die Anwendungsfälle beschränkt, für die sie erstellt wurden. Eine Nutzung bezüglich der genannten Anforderungen ist zwar teilweise möglich, allerdings müsste das Format jeweils geändert oder angepasst werden, um den Anforderungen gerecht zu werden, wobei einige Anforderungen derzeit ohne komplette Neudefinition der Lösung gar nicht abbildbar sind. Ein ausgewähltes Subset aus dem Common Information Model (CIM) wäre auch möglich, allerdings lässt CIM die Spezifikation der eigentlichen Kommunikation offen.

2.2 Entwicklung von Werkzeugen zur Vorhersage des Logistikgeschehens sowie des Energiebedarfs

Es wurde eine virtuelle Gesamtsystemumgebung für die Seeseite des Container Terminal Altenwerder (CTA) aufgebaut, welche in der Lage ist, die Logistikabläufe und Leistungsaufnahmen integriert abzubilden. So können unter anderem Auswirkungen verschiedener Betriebsstrategien auf die Kennzahlen des Terminalbetriebs, wie beispielsweise die Abfertigungszeiten von Containerschiffen oder den Gesamtenergieverbrauch in Simulationsexperimenten studiert werden. Eine Besonderheit des Simulationsmodells ist die Möglichkeit, die Abhängigkeiten zwischen dem Logistikgeschehen mit batterie-elektrisch angetriebenen Transportfahrzeugen und dem Geschehen der Elektrizitätsbereitstellung über eine Batteriewechselstation untersuchen zu können. Durch die modular integrierte Aufzeichnung von Leistungsaufnahmewerten schweren Geräts wie den Kai- und Lagerkranen kann zugleich der Gesamtenergieverbrauch im Blick behalten und mit ausgewertet werden. Außerdem kann simuliert werden, wie die Transportfahrzeuge in naher Zukunft die Container verfahren werden und wie viel Transportleistung ihnen im zeitlichen Verlauf abgefordert wird.

2.2.1 Aufbau Simulationsmodell

Für die Simulation von Containerterminalbetrieben sind kommerzielle (wie zum Beispiel AnyLogic¹⁰) und auch nicht-kommerzielle Simulationsplattformen verbreitet. Je nachdem welche konkrete Fragestellung behandelt wird oder welcher Ausschnitt genauer in den Blick genommen wird, finden sich sowohl systemdynamische als auch ein agentenbasierte Simulationsansätze wieder. Für das BESIC-Projekt wurde Tecnomatix Plant Simulation von SIEMENS PLM als Simulationsplattform ausgewählt, da diese auf dem objektorientierten Bausteinansatz basiert und bereits viele Grundfunktionen enthält. Aufgrund des hohen Verbreitungsgrads in der Logistikbranche ist es möglich, vorhandene logistikspezifische Bausteine (vorgefertigte Anlagenbausteine wie beispielsweise ein Blocklager mit Portalkran) zu nutzen, aber auch neue zu entwickeln und dem Bausteinkasten hinzuzufügen. Zur Implementierung der Bausteine wurden sowohl Grundfunktionen von Plant Simulation selbst sowie neu entwickelte Funktionen wie der sogenannte Energy Analyzer genutzt.

Bei der Modellierung des Containerterminalbetriebs mit Elektromobilität wurde auf einen objektorientierten Ansatz zurückgegriffen und es wurde das Baukastenprinzip angewandt. Der Grundgedanke dabei ist, dass ein Simulationsmodell aus vorgefertigten, wiederverwendbaren, parametrisierbaren Teilmodellen aufgebaut wird. So ist das Gesamtsystemmodell des Containerterminalbetriebs zum Beispiel durch Materialflussübergänge zwischen dem Bereich des Horizontaltransports und dem Umschlagsbereich an der Kaimauer oberflächlich auftrennbar. Außerdem können Steuerungselemente für den Containerterminalbetrieb wie beispielsweise das Auslösen von Be-/Entladevorgängen, die Zuweisung von Liegeplätzen, usw. mit einem entsprechenden Funktionsbaustein bereitgestellt werden.

In **Abbildung 7** wird ein Überblick zu dem Aufbau des Simulationsmodells mit seinen drei hauptsächlichen Funktionsbereichen gegeben. Es wurden die wesentlichen Fähigkeiten und Eigenschaften der schweren Geräte im Containerterminal für das Logistiksystem modelliert. Dies beinhaltet Kai- und Lagerkrane sowie die Transportfahrzeuge als Untersuchungsgegenstände, aber auch zum Beispiel Container als Transportgüter und Transportaufträge. Zusätzlich zu den Logistiksystemobjekten, die sich so oder so ähnlich in verwandten Arbeiten wiederfinden, wurden Objekte aus dem System der Elektrizitätsbereitstellung für einen Containerterminal aufge-

¹⁰ AnyLogic. Mehr-Methoden Simulationssoftware: Das einzige Simulationswerkzeug, das diskret-ereignisorientierte, agentenbasierte und systemdynamische Modellierung unterstützt [<http://www.anylogic.de/>]

baut. Es wurden wesentliche Fähigkeiten und Eigenschaften der Ladeinfrastruktur, das bedeutet Batterie-ladestation, Regalbediengeräte und Regallagerplätze bis hin zur Wechselbatterie modelliert.

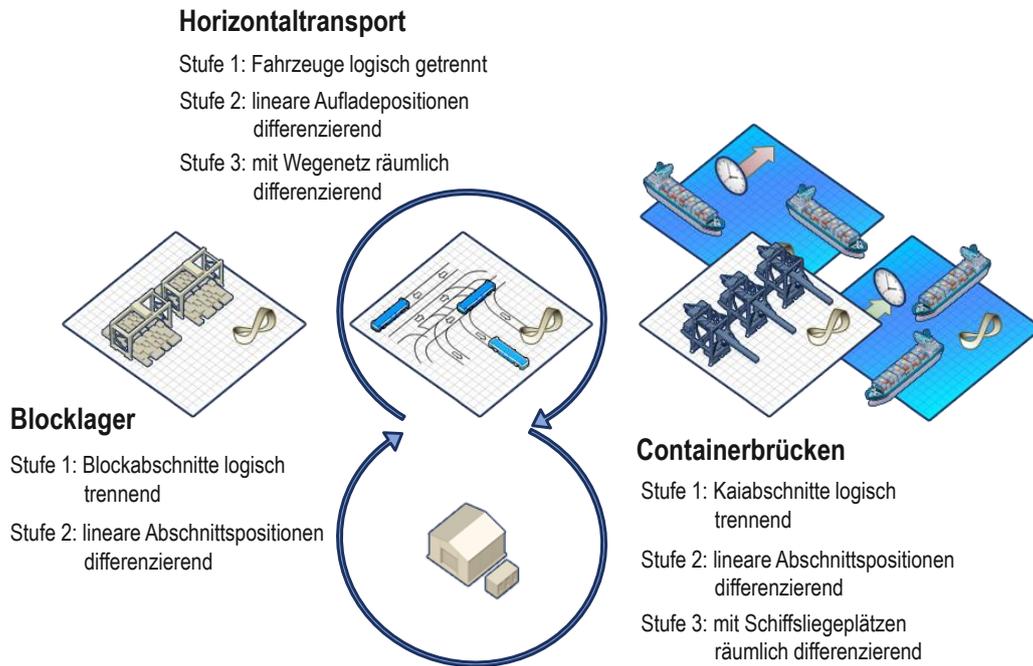


Abbildung 7: Überblick zu den im Simulationsmodell nachempfundenen Funktionsbereichen eines Containerterminals

Ziemlich rasch wurde das Simulationsmodell im BESIC-Projekt auf einer niedrigen Detaillierungsstufe mit sämtlichen Geräteverhalten vervollständigt. Seither sind die Materialflüsse der Container auf ihren Umschlags- und Transportwegen und die Ankunfts- und Abfahrtswege der Containerschiffe samt Ladebuchten nachzuvollziehen. Ihre Bewegungen beim Be- und Entladen von Schiffen sind im Wesentlichen durch Materialflusstationen vorgezeichnet: Ein Importcontainer beispielsweise nimmt einen Weg vom Schiff als Ladungsträger über den vorderen und hinteren Kranteil einer Containerbrücke auf ein AGV – und von dort weiter an einen Lagerkran zur Einlagerung. Diese Abfolge von Teilprozessen im Containerterminalbetrieb wurde durch die Stationsanordnung bzw. auf Materialflussebene in erster wie in zweiter Detaillierungsstufe einbeschrieben; auf eine Materialflusstation, die beispielweise einen Schiffsentladevorgang repräsentiert, folgt eine Materialflusstation für das Abladen auf ein AGV, usw. Die Materialflusstationen wurden zur Mitte des Jahres über die Funktionsbereiche des Containerterminalbetriebs in den modular aufgebauten Netzwerkbausteinen verkettet. Damit wurde eine Entwurfsentscheidung getroffen, das Simulationsmodell eher materialflusstechnisch stimmig aufzubauen als die Umschlags- und Transportgeräte wirklichkeitsgetreu anzuordnen und zu visualisieren.

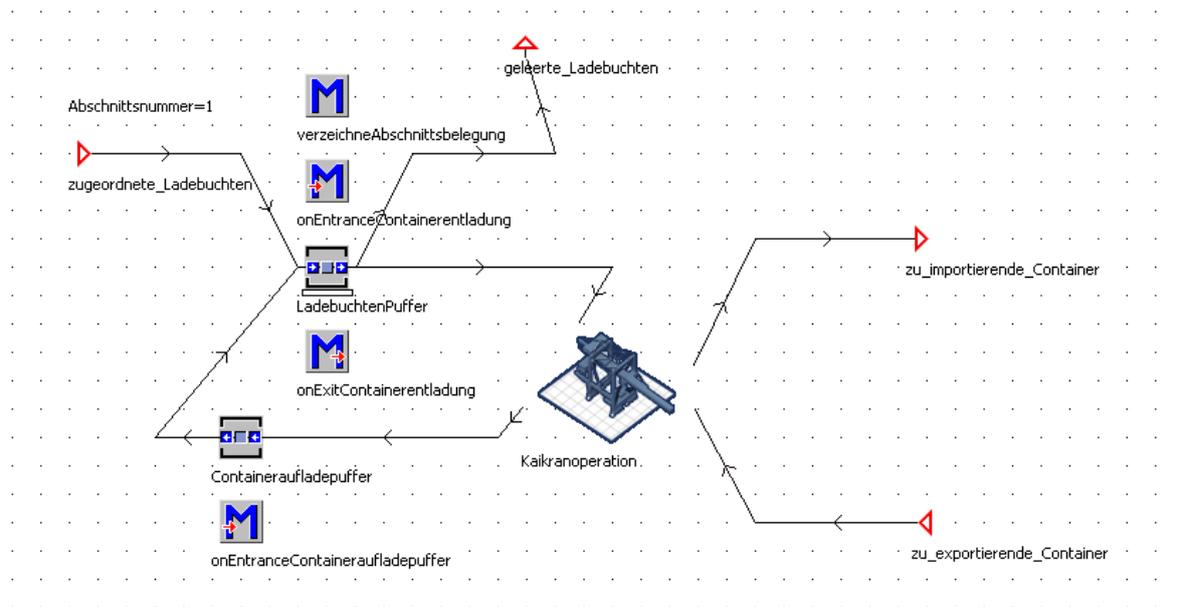


Abbildung 8: Ausschnitt im Kaiabschnittsbereich mit Abfolge der materialflusstechnischen Stationen

Das Modell eines einzelnen Umschlagsgeräts wie ein Kaiabspannung besteht aus einem oder mehreren elementaren Materialflussbausteinen wie zum Beispiel Einzel- oder Parallelstationsbausteinen oder auch Lagerbausteinen. Auf diesen Geräte-/Objektmodellen können wiederum komplexere Modelle für die Bereiche der Containerbrücken, der Blocklager und das Horizontaltransportareal aufbauen. Wie in Abbildung 8 dargestellt, wurden für eine erste Detaillierungsstufe Kaiabschnittsbereiche modelliert, in denen die Kaiabspannungsbauwerke eingebettet sind. Im Kaiabschnittsbereich wird der Zugriff eines Kaiabspannungsgeräts auf die im Nahbereich befindlichen Ladebuchten auf dem Schiff abgebildet. Dabei finden auf dieser Modellierungsebene ebenfalls elementare Materialflussbausteine Verwendung; mit Hilfe der Kapazität des Pufferbausteins (Ladebuchtenpuffer in Abbildung 8) kann beispielsweise der Zufluss von Ladebuchten in den betreffenden Kaiabschnittsbereich reguliert bzw. die Menge von Ladebuchten in einem Nahbereich des Kaiabspannungsgeräts abgesteckt werden. Entlang der Kanten fließen Container (Übergänge zum Subnetzwerkbaustein rechts) und Ladebuchten (Übergänge links und oben) als bewegliche Elemente. An den Materialflussstationen befinden sich Methodenbausteine (blaues „M“), die als Steuerelemente auf die Materialflussereignisse des Ein-/Austritts beweglicher Elemente (wie es die Container oder Ladebuchten sind) auf die Stationsbausteine reagieren.

Mit der zweiten Detaillierungsstufe wurde in dem Simulationsmodell eine räumliche Differenzierung eingeführt. Dabei wurden unter anderem eine Positionierung von Kränen entlang der Kaimauer und die Möglichkeit zum Verschieben von Containerbrücken aufgegriffen. So können beispielsweise im Containerbrückenbereich die linearen Positionen eines Schiffbuchs und von Kaiabspannungsgeräten verwaltet werden. Es kann daraufhin im Simulationsmodell bestimmt werden, ob ein Kaiabspannungsgerät bezogen auf seine Position auf eine gewisse Ladebucht zugreifen kann oder nicht. Im Horizontaltransportareal wurde ein Wegenetz zwischen Kai- und Lagerkränen aufgebaut, welches von AGV als bewegliche Elemente der Fahrzeugklasse befahren wird. Für ein AGV wird bei Bearbeitung eines Transportauftrags dynamisch ein Fahrtweg zwischen dem Ursprungs- und dem Zielort bestimmt. Es kann daraufhin die Fahrtstrecke ermittelt und daran ein angemessener Energieverbrauch festgemacht werden. Beim Aufbau des Wegenetzes konnte im BESIC-Projekt nicht – wie zwischenzeitlich gewünscht – auf eine vorhandene Klassenbibliothek für fahrerlose Transportsysteme zurückgegriffen werden. Im Produktionsumfeld finden sich oftmals kreisförmig gestaltete, in Bahnen verlaufende Wegenetze wieder; das Wegenetz verbindet hier in der Regel fest positionierte Verarbeitungsstationen oder Produktionsinseln miteinander. Es ist sehr selten anzu-

treffen, dass sich ein solches Produktionsumfeld von der Anordnung der Verarbeitungsstationen her reorganisieren kann. Im Gegensatz dazu ist das Wegenetz eines Containerterminalbetriebs im Bereich der Hauptfahrspuren vollständig vermascht; bis auf Einschränkungen des Wenderadius können AGV an jedem Wegknoten von einer Hauptfahrspur in eine Kai- oder Lagerspur queren. Derartige Kreuzungsbausteine sind allerdings in der Klassenbibliothek für fahrerlose Transportsysteme nicht vorgesehen.

Der Gesamtsystemzustand wird in Hinsicht auf den Materialfluss von Schiffen, Ladebuchten und Containern in einer graphischen Benutzungsoberfläche wiedergegeben. Die **Abbildung 9** zeigt das Wegenetz im Horizontaltransportareal. Über die zweidimensionale Darstellung lässt sich vor allen Dingen die simulierte Aktivität und Position von Umschlagsgeräten und Transportfahrzeugen bis hin zu den Ladestellen in der Station nachvollziehen. Während eines Simulationslaufes kann der Informationsfluss mit Blick in simulierte Transportauftragstabellen, Liegeplatzverzeichnisse, Containerlisten, etc. mitverfolgt werden.

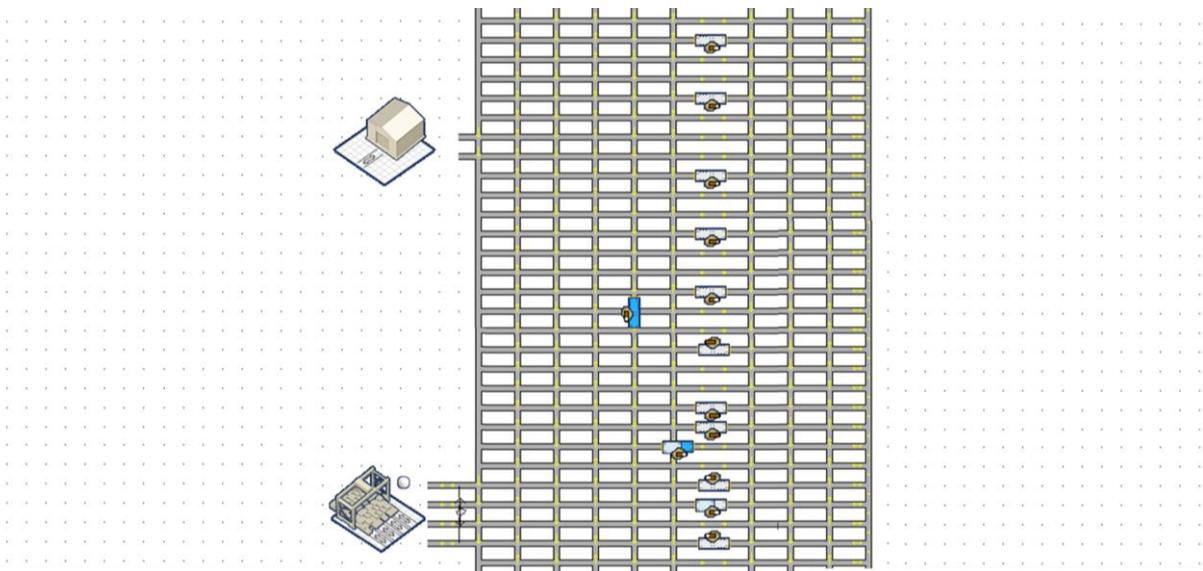


Abbildung 9: Ausschnitt eines Modells für den Horizontaltransportbereich mit räumlicher Differenzierung

Schließlich wurden ausgewählte Geräte-/Objektmodelle, wie beispielsweise das in Abbildung 10 gezeigte Modell eines vorderen Kranteils, verfeinert. Zuvor existierende Objektbausteine wurden durch Objektbausteine mit höherer Detaillierungsstufe abgelöst. Der vordere Kranteil verfügt über einen Ausleger, der über zwei Achsen bewegt werden kann. Die Achsbewegungen werden durch zwei Wegbausteine modelliert. Der Trolley befördert die Container von Bord des Schiffes oder an Bord des Schiffes. Er wird durch ein bewegliches Element der Fahrzeug-Klasse modelliert, welches die ihm aufgeladenen Container als bewegliche Elemente zwischen einer Schiffsplattform und einer Laschplattform umlagert. In einer ersten Detaillierungsstufe wird zum Beispiel eine Kaikranoperation durch nichts mehr als einen Einzelstationsbaustein repräsentiert. Ein Umschlagsvorgang am Kai dauert hierbei so lange wie die Bearbeitungszeit des Einzelstationsbausteins ausfällt. Ein Container, das bewegliche Element, tritt erst nach der Bearbeitungsdauer im Ganzen aus dem Einzelstationsbaustein aus und geht dann im Falle eines Importcontainers landseitig zur Beladung eines AGV über. Tatsächlich gibt es allerdings zwischen dem see- und landseitigen Kranteil eine Laschplattform, wodurch der Containerumschlag in zwei voneinander entkoppelten Etappen durchgeführt werden kann. Die Pufferwirkung dieser Laschplattform ist mit einem einzelnen Einzelstationsbaustein nicht geeignet abbildbar, selbst wenn stochastische Bearbeitungszeit gewählt/eingestellt wird. Daher wurde für das Simulationsmodell in zweiter Detaillierungsstufe entschieden, eine Containerbrücke in zwei Teilen zu repräsentieren. Es wurde je ein Geräte-/Objektmodell für den vorderen und hinteren Kranteil geschaffen und die Laschplattform explizit ins Modell des vorderen Kranteils aufgenommen.

Dadurch erscheint das Simulationsmodell bezüglich des Be-/Entladens von Schiffen und dem Auf-/Abladen von Containern an bereitgestellte AGV übersichtlicher und wartbarer.

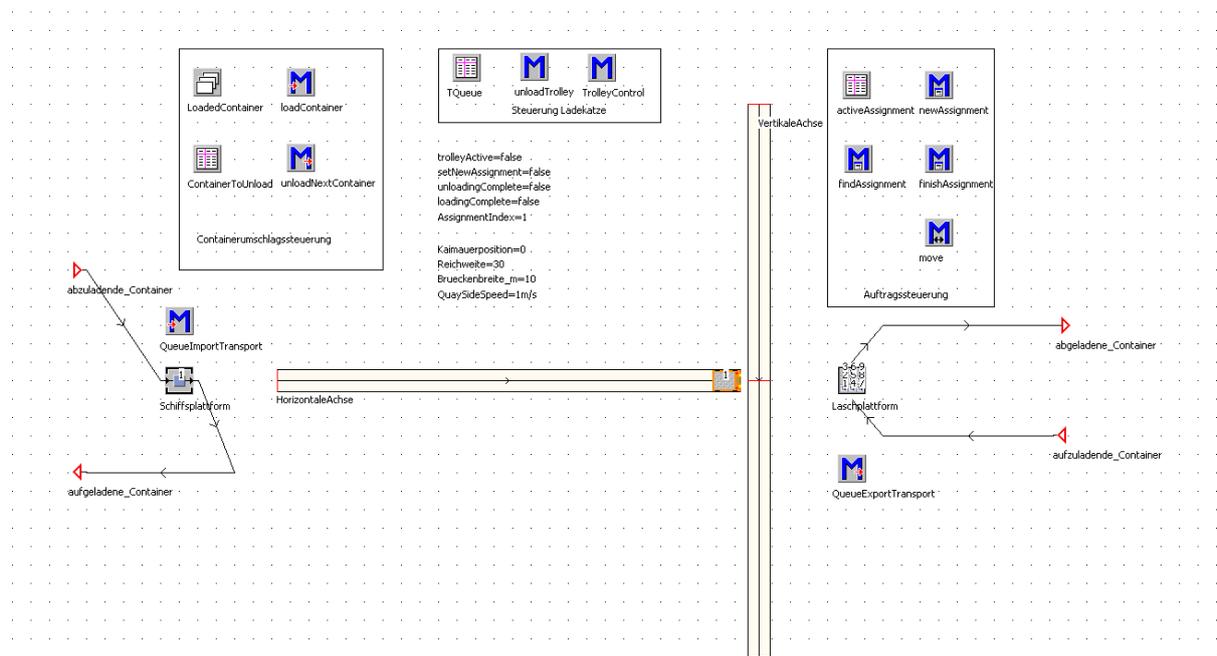


Abbildung 10: Ausschnitt eines Objektmodells für einen Kai Kran von einer Containerbrücke

Es ist auch wichtig, die Zusammensetzung des Logistiksystems, das heißt die verfügbaren Umschlags- und Transportkapazitäten, Anzahlen der einzelnen Logistiksystemelemente, etc. mit abzubilden. Das Simulationsmodell wurde in der Weise aufgebaut, dass es insbesondere bezüglich der Ladeinfrastruktur bzw. für verschiedene Ausstattungsszenarien mit Hilfe von Parametern konfiguriert werden kann. Beispielsweise kann die Anzahl der Containerbrücken als ein Modellparameter zu Beginn eines Simulationslaufes festgelegt werden.

Des Weiteren gilt es bezüglich der Bearbeitung von Transportaufträgen zu beachten, dass beim Import von Containern in den Terminal ein stimmiger Zielort festgestellt wird. In erster Linie hat die Auswahl eines Containerblocklagers für die jeweiligen Transportaufträge einen großen Einfluss auf die zurückzulegenden Fahrtstrecken. In zweiter Linie wirkt sich auch die jeweilige Auswahl eines Stellplatzes der Container innerhalb des Blocklagers auf die Energienachfrage durch Lagerkräne aus. Zunächst wurde eine zufällige Auswahlstrategie mit Gleichverteilung im Simulationsmodell umgesetzt; hierbei ist es ebenso wahrscheinlich, dass ein Importcontainer an das eine oder das andere Ende des Terminals verfahren wird. Das Einlagerungsverhalten wurde schließlich in der Weise angepasst, dass eine Dreiecksverteilung bei der zufälligen Auswahl eines Lagerblocks gemacht wird; dabei ist es am wahrscheinlichsten (Spitze des Dreiecks), dass ein Importcontainer in einem der jeweiligen Containerbrücke gegenüberliegenden Lagerblock eingelagert wird. Mit zunehmender Luftlinienentfernung zu der Containerbrücke, an der ein Container auf die Landseite umgeschlagen wurde, wird es weniger wahrscheinlich, dass der Lagerblock für die Einlagerung ausgewählt wird (bildet die Form eines gleichschenkeliges Dreiecks).

Um das Transportauftragsaufkommen im Simulationsmodell korrekt abzubilden, muss jedoch auch auf das Auslagerungsverhalten eingegangen werden. Aktuell werden die zu einem Schiff gehörenden Container bei dessen Ankunft gleichverteilt in den Lagerblöcken erzeugt. Von dort bahnen sie sich ihren direkten Transport- und Umschlagsweg vom jeweiligen Lagerblock an Bord des Schiffes. In der Realität werden allerdings vor Ankunft des Containerschiffes Vorbereitungen zum Beladen des Schiffes getroffen. Maßgeblich ist die Anordnung der Exportcontainer im Nahbereich des geplanten Schiffliegeplatzes. Dies wird durch Umfuhren von zu exportierenden

Containern vorab der Schiffsankunft erreicht. Während der Flottenversuche wurde ebenfalls durch einen Vergleich von simulierten und tatsächlichen Betriebsdaten (wie zum Beispiel der Anzahl von Transportaufträgen pro Containerbewegung) geprüft, ob hinsichtlich der Simulation des Energieverbrauchs der AGV und der Energienachfrage der Lagerkräne bedeutende Abweichungen im Auslagerungsverhalten bestehen. Im Simulationsmodell wird ausdrücklich nicht der eigentliche Bestand von Containern in den Blocklagern verwaltet. Die Container stehen im Verlauf der Simulation nicht durchgehend auf dem Terminalgelände, sondern sie werden erst bei Ankunft eines Containerschiffes in einem Quellenbaustein erschaffen bzw. lediglich ihr Materialfluss zwischen Quellen- und Senkenbaustein nachvollzogen. Mit dieser Herangehensweise werden bislang die Terminaloperationen auf der Hinterlandseite ausgeblendet, welche sich offensichtlich auf den zu verwaltenden Containerbestand während eines Simulationslaufes auswirken würden.

2.2.2 Modulare Modellerweiterung

Dank einer umfangreichen Datenerhebung im Rahmen der Flottenversuche (siehe auch unter Durchführung von Flottenversuchen zum regulären Betrieb) konnten an dem Grundmodell diverse Stellgrößenkorrekturen vorgenommen werden, um das Logistikgeschehen realistischer wiedergeben zu können und die Vorhersagegüte bei einer Lastgangsimulation zu steigern. Gleichzeitig wurde der gesamte Terminalaufbau nochmals genau abgeglichen, um Abweichungen der Fahrtstrecken in der Realität von denen in der Simulation auszumerzen. Wie in **Abbildung 11** schematisch dargestellt, wurde die feste Anordnung der Blocklager sowie der daran im Fahrkurs fest angeschlossenen Hauptfahrspuren und zugehöriger Wartebereiche übernommen. Zu guter Letzt wurde auch eine Batteriewechselstation im Simulationsmodell an ihre passende Randstelle im Fahrkurs gesetzt und die korrekten Fahrtrichtungen vorgegeben. Bemerkenswerterweise hatte die neuere Anordnung der Speziallager für die zu temperierenden Container eine Rückwirkung auf die simulierte Bearbeitungszeit von Transportaufträgen. Das heißt, die korrekte Anordnung sollte sich als weniger stauanfällig herausstellen.

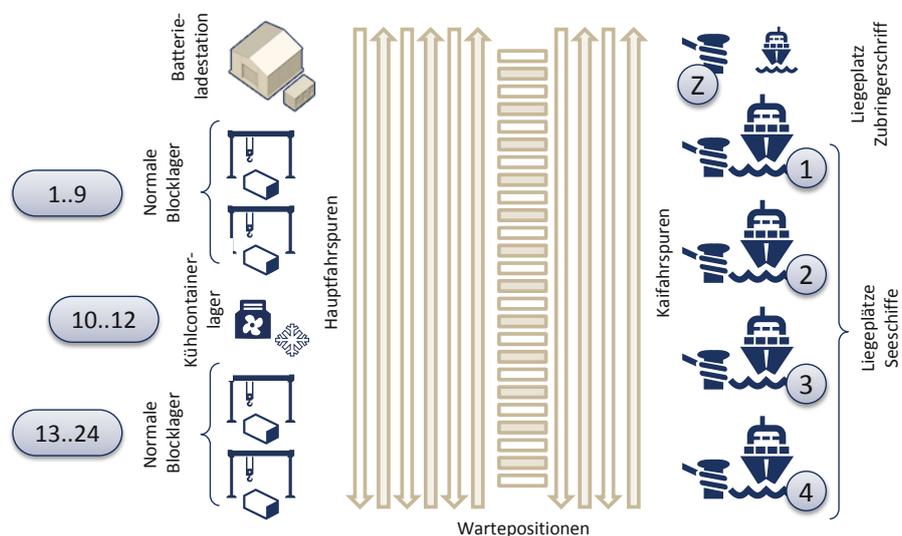


Abbildung 11: Schematische Anordnung der Liegeplätze, Batterieladestation, Fahrspuren und Wartepositionen im CTA

Bezüglich des Lastgangverhaltens war außerdem eine genauere Abbildung der Zuführung und des Abtransport von Containern durch die Hinterlandanbindung erforderlich. Im Zuge dessen können in einem Simulationslauf auch Veränderungen im Kühlcontainerbestand besser nachvollzogen werden. Die Transportfahrzeuge auf der Seeseite des Containerterminals weisen nunmehr korrekte Fahrauftragszyklen auf. Die Vergabe von Transportaufträgen an die Fahrzeuge, die Disposition von Transportfahrzeugen in die Nähe von Containerbrücken und Lagerblöcken, etc. wurde zufriedenstellend umgesetzt. Das Simulationsmodell ist insbesondere in Bezug auf das

Ein-/Auslagerungsverhalten an den Blocklagern, die Zuordnung und Bewegung von Containerbrücken entlang der Schiffsladebuchten detailliert aufgebaut.

2.2.2.1 Verfeinerung der Objekt- und Ablaufmodelle im Terminal

Das Simulationsmodell verfügt über eine Mehrzahl von Steuerungsbausteinen, mit denen die Ablaufentscheidungen für den Containerterminalbetrieb nachempfunden werden. In der Praxis werden wiederholt vom Terminalleitsystem und anderen Entscheidungen darüber getroffen, wie zum Beispiel Containerschiffe abzufertigen sind, an welchen Lagerplatz ein Container gebracht wird und so weiter. Zum einen sind Entscheidungen in unmittelbarer Folge erforderlich, wie zum Beispiel die Vergabe eines Transportauftrags an ein verfügbares Transportfahrzeug ad hoc; zum anderen sind aber auch durchaus Entscheidungen wie die Zuweisung eines Liegeplatzes am Kai nötig, welche die Abläufe über einen relativ langen Zeitraum der betrieblichen Steuerung mitbestimmen. In Tabelle 4 sind die logistischen Problembereiche eines Containerterminalbetriebs für die Seeseite skizziert und es wird eine Übersicht der im Simulationsmodell nachgebildeten Betriebsstrategien gegeben. Für einige Problembereiche wurden alternative Strategien umgesetzt, so dass deren unterschiedliche Auswirkungen durch Simulationsexperimente studiert werden können. Priorisierungsstrategien sind mit einem Buchstaben gekennzeichnet; sie werden übergreifend zu den mit Ziffern markierten Basisstrategien verwendet werden.

Tabelle 4: Übersicht der logistischen Problemstellungen im Container Terminal Altenwerder und deren operativer Bearbeitung

Nr.	Terminalbereich	Betriebsstrategie	Kurzbeschreibung
		Liegeplatzzuweisung	Bei Ankunft eines Containerschiffes wird entlang der Kaimauer ein Liegeplatz ermittelt. Das Schiff muss in gesamter Länge an die Kaimauer passen. Falls ein Liegeplatz gefunden werden kann, so wird das Containerschiff an den betreffenden Kaimauerabschnitt weitergeleitet. Anderenfalls sich kurzfristig (z. B. innerhalb einer Betriebsstunde) kein Liegeplatz finden lässt, muss das Containerschiff abgewiesen werden. Die Kaimauer des Containerterminals ist gleichmäßig in vier Liegeplatzareale eingeteilt.
A		Strategie mit Vorrangarealen	Zubringerschiffe oder Kähne werden vorrangig in die oberen Liegeplatzareale gebracht, weil der Containerterminal dort über einige Containerbrücken verfügt, die nicht zum Entladen/Beladen von größeren Seeschiffen geeignet sind. Handelt es sich beim eingetroffenen Containerschiff um ein Zubringerschiff oder einen Kahn, so wird zuerst nach einem Liegeplatz in den oberen Arealen geschaut. Gegebenenfalls findet sich der Liegeplatz in einem der priorisierten Areale.
1		Ausgleichsstrategie (Best-Fit)	Für jedes Liegeplatzareal wird bestimmt, wie viel Verschnitt an der Kaimauer der Länge nach übrig bliebe, wenn das Containerschiff darin platziert würde. Bei dem Areal mit dem niedrigsten Verschnitt findet sich der Liegeplatz.

Details bei der Liegeplatzzuweisung

Bei bisherigen Validierungsmaßnahmen wurde festgestellt, dass es zu Verzögerungen beim Containerumschlag kommen kann, wenn das Terminal voll ausgelastet ist und sich Seeschiffe am vorderen Abschnitt der Kaimauer befinden. Diese entsteht dadurch, dass sich auf der gegenüberliegenden Seite vom vordersten Liegeplatz 1 keine Blocklager befinden (siehe **Abbildung 11**). Die Transportfahrzeuge müssen hierdurch weitere Strecken für den Containertransport zurücklegen, erreichen den Portalkranteil der Containerbrücke womöglich nicht rechtzeitig und bewirken somit eventuell einen Stillstand des Kaikrans. Um dies zu relativieren/auszugleichen, ist es notwendig, dem Schiff mehr Transportfahrzeuge zuzuweisen, welche bei einer Vollauslastung jedoch nicht immer zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund wurde die Liegeplatzplanung dementsprechend angepasst, dass dem vordersten Liegeplatz vorwiegend Zubringerschiffe mit einem geringen Containerbestand zugewiesen werden. Seeschiffe werden direkt den hinteren Liegeplätzen Nr. 2, 3 oder 4 zugewiesen.

	 <p>Containerbrücken-zuordnung</p>	<p>Die Container sind in den Schiffen in Ladebuchten untergebracht. Containerbrücken besitzen eine gewisse Reichweite; sie können entlang der Kaimauer eine gewisse Anzahl von Ladebuchten überdecken, die in dem Containerschiff nebeneinander angeordnet sind. Die Ladebuchten eines eingetroffenen Schiffes werden dementsprechend abgeteilt. Für das Entladen/Beladen solcher Abteilungen müssen ihnen die Containerbrücken konkret zugeordnet werden. Eine Containerbrücke kann zu einer Zeit nur eine einzige Abteilung von Ladebuchten bearbeiten. Sie können allerdings entlang der Kaimauer bewegt werden, um die Bearbeitung einer Abteilung vorläufig abzuschließen und die Bearbeitung einer anderen wieder aufzunehmen.</p>
<p>①</p>	<p>Einhaltungsstrategie Abfertigungszeit (Deadline)</p>	<p>Für jedes liegende Schiff werden die Abteilungen mit den Ladebuchten danach untersucht, wann gemäß den Anzahlen von Containerbewegungen die Bearbeitung durch eine Containerbrücke abgeschlossen werden kann. Falls die ausstehende Bearbeitungszeit kritisch für die geplante Abfahrtszeit des Containerschiffes ist, wird dringlich eine Containerbrücke zugeordnet. Sollte es erforderlich sein, werden bestehende Zuordnungen von Containerbrücken an Abteilungen ohne Dringlichkeitsstufe aufgelöst.</p>
	 <p>Personalwechsel Kaikräne</p>	<p>Nach einer durchschnittlich achtstündigen Arbeitszeit wird die Besetzung einer Containerbrücke ausgewechselt. Hierbei muss die Arbeit der Containerbrücke aus Sicherheitsgründen solange ruhen bis der Schichtwechsel vollzogen ist. In dieser Zeit werden keine Container umgeschlagen und Containerbrücken verfügen über keine Leistungsaufnahme in dieser Zeit.</p>
<p>①</p>	<p>Exakter Schichtwechsel</p>	<p>Ein Schichtwechsel findet jeweils um 7 Uhr, 15 Uhr und 23 Uhr statt. Die 15 minütigen Schichtwechsel werden synchron an allen Containerbrücken durchgeführt.</p>
<p>②</p>	<p>Rauschender Schichtwechsel</p>	<p>Ein Schichtwechsel findet jeweils um 7 Uhr, 15 Uhr und 23 Uhr statt. Die 15 minütigen Schichtwechsel finden dabei nicht synchron statt. Dies wird erreicht, indem ein stochastisches Rauschen zur Bestimmung der Uhrzeit eines Schichtwechsels eingebaut wird. So wird für jede Containerbrücke einzeln ein fünfminütiges Intervall um die geplante Schichtwechselzeit gelegt. Innerhalb dieses Intervalls wird die genaue Uhrzeit des Schichtwechsels per Zufall bestimmt.</p>

Details bei der Liegeplatzzuweisung

Zuvor erfolgte die Containerbrückenzuweisung durch eine einfache mathematische Formel, welche einem Containerschiff so viele Bücken wie nötig zuordnet, um die laut Segelliste geplante Liegezeit des Schiffes einhalten zu können. Zusätzlich wird die maximale Anzahl der Containerbrücken für ein Schiff durch den verfügbaren Platz (max. eine Containerbrücke alle 30 Meter) und den überhaupt zur Verfügung stehenden Brücken begrenzt. Nach der Zuweisung der Brücken an ein Schiff wird automatisch der Be- und Entladeprozess gestartet. Das Grundmodell beinhaltet diesbezüglich eine einfach geartete Strategie, so dass sich eine Containerbrücke erst bewegen sollte, sobald sie drei benachbarte Ladebuchten komplett entladen und beladen hat. Bei Validierungsmaßnahmen stellte sich jedoch heraus, dass diese Strategie unter bestimmten Voraussetzungen zu erheblich längeren Schiffsabfertigungszeiten führte, als in der Segelliste angesetzt war und sie sich in der Realität gezeigt haben. In **Abbildung 12** wird das aus ehemaligen Strategien herrührende Fehlverhalten schematisch dargestellt. Sei ein Containerschiff mit einer Anzahl von neun Ladebuchten (je drei von einer Containerbrücke erreichbare Ladebuchten sind zu einem Abteil zusammengefasst) abzufertigen, das insgesamt 120 gleichmäßig verteilte Container zu löschen hat. Dann gibt es nun drei Abteile, die jeweils 40 Importcontainer enthalten. Bei einer zu erwartenden zwei minütigen Umschlagszeit pro Container und einer geplanten zweistündigen Liegezeit des Schiffes würden rein rechnerisch zwei Containerbrücken genügen, um das Schiff plangemäß vollständig zu entladen. Die im Grundmodell verwendete Strategie C1 ordnet dem Schiff nun zwei Containerbrücken zu, welche mit dem Löschvorgang starten (Phase 1). Rechnerisch sind nach 80 Minuten die ersten beiden Abteile gelöscht und die Kräne starten gleichzeitig mit dem Entladen des dritten Abteils. Da jedoch aus Platzgründen nur eine Containerbrücke an einem Abteil arbeiten kann, kann nur eine Containerbrücke fortfahren (Phase 3). Nach der geplanten

Liegedauer von zwei Stunden sind somit noch 20 Container im dritten Abteil vorhanden (Phase 4). Erst nach weiteren 40 Minuten ist auch dieses Abteil geleert und das Schiff abgefertigt.

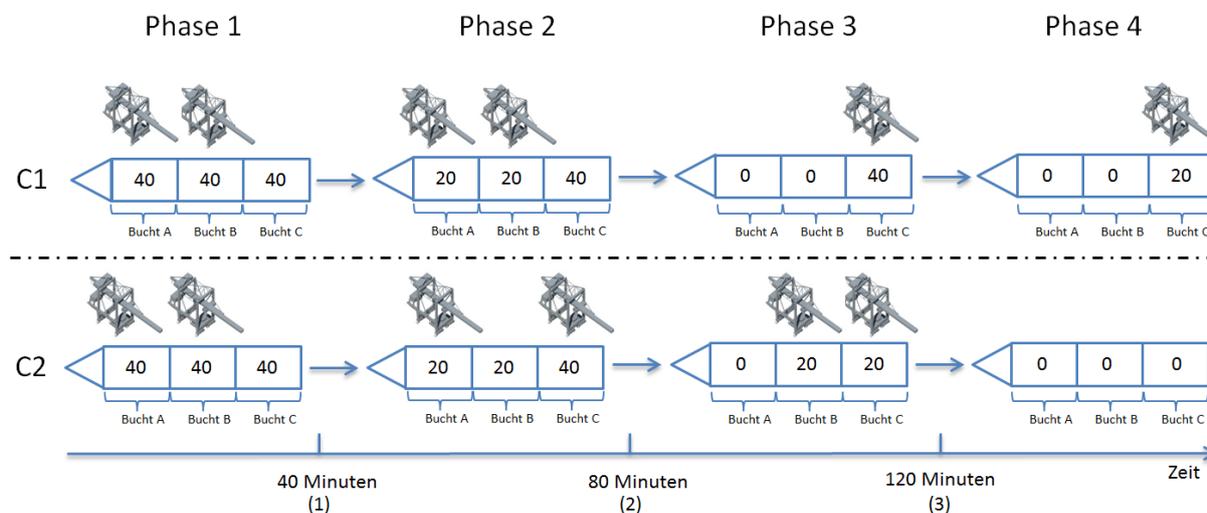
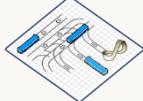


Abbildung 12: Schematischer Vergleich von Strategien der Containerbrückenzuordnung

Aus diesem Grund wurde die Strategie der Containerbrückenzuordnung angepasst (Strategie C2), um Schiffe möglichst nah ihrer geplanten Liegedauer abzufertigen. Dies bedeutet, dass eine Containerbrücke von einem aktiven Arbeitsprozess abgezogen und einem neuen Abteil zugeordnet werden kann. In **Abbildung 12** ist im Prinzip die kürzere Abfertigungsdauer verdeutlicht. Wieder werden dem Schiff zwei Containerbrücken zugeordnet (Phase 1). Jedoch wird nach bereits 40 Minuten die Containerbrücke vom zweiten Abteil abgezogen und das Entladen für das dritte Abteil begonnen (Phase 2). Nach 80 Minuten hat die erste Containerbrücke sämtliche im ersten Abteil befindlichen Container gelöscht und wird nun dem zweiten Abteil zugeordnet (Phase 3). Dann nämlich befinden sich jeweils 20 Container in den Abteilen zwei und drei.

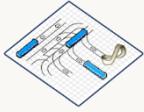
Nr.	Terminalbereich	Betriebsstrategie	Kurzbeschreibung
	 	Transportauftragszuweisung	Sämtliche Import- und Exportcontainer müssen den Horizontaltransportbereich auf der Seeseite zwischen Blocklagern und Containerbrücken passieren. Es gibt Listen mit Container für das Entladen und Beladen der Schiffe. Ein Containerschiff wird immer zuerst entladen und dann beladen. Wenn ein Container für den Import bzw. den Export an die Reihe kommt, wird ein Transportauftrag generiert. Das bedeutet für einen Importcontainer den Abtransport von der Containerbrücke in Richtung Blocklager und für einen Exportcontainer die Abholung vom Blocklager in Richtung Containerbrücke. Wenn mehrere Transportaufträge zeitgleich ausstehend sind, werden sie in zufälliger Reihenfolge vergeben.
1		Strategie zur Reduktion der Fahrtstrecken (Nearest Vehicle)	Für jeden ausstehenden Transportauftrag wird ermittelt, wie weit die Transportfahrzeuge vom Ursprungsort des Containers entfernt sind. Der Transportauftrag wird dem nächstgelegenen Transportfahrzeug zugewiesen.
2		Strategie zum Ausgleich des Ladezustandsniveaus (Highest Battery Status)	Für jeden ausstehenden Transportauftrag wird ermittelt, welchen Batterieladezustand die Transportfahrzeuge aufweisen. Das Transportfahrzeug mit dem höchsten Batterieladezustand erhält den Transportauftrag.

 		<p>Wegfindung</p> <p>Die Bearbeitung von Transportaufträgen findet im Grunde genommen in mehreren Teilfahrten statt. Beim Transport eines Containers vom Blocklager zu einer Containerbrücke wird ein Transportfahrzeug beispielsweise zwischendurch über einen Wartebereich geführt, wo es halten kann, bis eine Spur für das Abladen an der Containerbrücke frei geworden ist. Wenn ein Transportfahrzeug eine Teilfahrt aufnimmt, wird zentralisiert ein Weg zwischen dem derzeitigen Standort und dem Zielort bestimmt.</p>
A	<p>Vorfahrtsregelung / Fahrtrichtungen</p>	<p>Kaispuren dürfen nur befahren werden, um einen Beladeplatz zu erreichen. Fahrzeuge auf Hauptfahrspuren oder Kaifahrspuren haben Vorfahrt gegenüber den Fahrzeugen auf Querspuren. Die Basisgewichte der Kaifahrspuren werden höher als die der Hauptfahrspuren gewählt, damit Transportfahrzeuge diese schnellstmöglich räumen.</p>
1	<p>Kürzeste Wege Strategie zur Reduktion der Fahrtstrecken (Shortest Path)</p>	<p>Um zu vermeiden, dass sich die Transportfahrzeuge auf ihren Wegen gegenseitig blockieren, werden die Kreuzungsbausteine/Wegelemente nach und nach gewichtet. Ein Kreuzungsbaustein/Wegelement, der/das Wegpunkt eines bereits festgelegten Fahrtwegs ist, erhält ein höheres Gewicht. Dadurch wird es kürzer/günstiger eingeschätzt, stark ausgelasteter Kreuzungsbausteine/Wegelemente zu umfahren. Im Wegenetz werden Fahrtrichtungen auf den Fahrspuren, Haltepositionen und Wenderadien der Fahrzeuge berücksichtigt.</p>

Details bei der Disposition von Transportfahrzeugen und der Transportauftragsvergabe

Bei Importcontainern werden stets die nächsten drei anstehenden Transportoperationen freigegeben, um Container von der Brücke aufzunehmen. Das bedeutet, eine neue Transportoperation wird immer erst dann freigegeben, wenn eine Aufladeoperation abgeschlossen wurde. Dies führt letzten Endes dazu, dass über die meiste Zeit hinweg zwei oder drei Containertransporter an einer Containerbrücke zu finden sind. Durch die frühzeitige Auftragsfreigabe werden die Transportfahrzeuge im Endeffekt rechtzeitig in den Nahbereich einer aktiven Containerbrücke disponiert, ohne dieser fest zugeordnet zu bleiben.

 		<p>Vornahme Batteriewechsel</p> <p>Während sich die Transportfahrzeuge im Horizontaltransportbereich bewegen, verbrauchen sie Energie. Bei den batterie-betriebenen Transportfahrzeugen entlädt sich die Wechselbatterie hauptsächlich beim Fahren. Beinahe vernachlässigbar ist der Energieverbrauch beim Stillstand eines batterie-betriebenen Fahrzeugs. Damit das Fahrzeug nicht komplett liegenbleibt, muss es regelmäßig Energie in die Wechselbatterie nachladen oder eine frisch geladene Wechselbatterie bekommen.</p>
A	<p>Vorbereitungsstrategie für Hochleistung (Look-Ahead)</p>	<p>Der mittlere Ladezustand über die gesamte Fahrzeugflotte kann als das Ladezustandsniveau bezeichnet werden. Bekanntlich unterliegen die Auslastung des Containerterminals bzw. das Transportauftragsaufkommen gewissen Schwankungen. Vorab eines Zeitraums mit hoher Containerterminalauslastung empfiehlt es sich, das Ladezustandsniveau bewusst anzuheben, um Ausfahrten der Fahrzeuge zur Batteriewechselstation oder gar zu einem Ladesäulenparkplatz innerhalb einer solchen Hochphase zu vermeiden. In regelmäßigen Zeitabständen wie zum Beispiel zu jeder vollen Stunde werden anhand des Schiffsankunftsplans die Gesamtzahlen die für die nächsten Stunden vorangemeldeten und der in den letzten vergangenen Stunden transportierten Import- und Exportcontainer gezählt. Falls nach dieser Schätzung das Transportauftragsaufkommen zunehmend ist, bietet sich als vorbereitende Maßnahme ein zeitlich gestaffelter Batteriewechsel bzw. die Ausfahrt zu einem Ladesäulenparkplatz für die Batteriesysteme mit dem niedrigsten Ladezustand an.</p>
1	<p>Grenzwertstrategie Erhaltungsstrategie Reserveenergie</p>	<p>Beim Fahren und auch bei längerem Stillstand des Fahrzeugs wird die Wechselbatterie allmählich entladen. Wird beispielsweise ein Ladezustand von 25 % der Nutzkapazität des Batteriesystems erreicht, so wird der Bedarf zum Wechsel bzw. Nachladen festgestellt. Das Fahrzeug kann dann auf Reserve noch einen aktuell bearbeiteten Transportauftrag zu Ende führen und fährt anschließend eine Batteriewechselstation oder einen Ladesäulenparkplatz an.</p>

	 <p style="text-align: center;">Auswahl Wechselstation</p>	<p>Bei Anwendung eines Batteriewechselkonzepts können die Transportfahrzeuge ihre aktuelle Wechselbatterie bei Bedarf gegen eine frisch geladene Wechselbatterie tauschen. Der Batteriewechsel erfolgt vollautomatisiert über eine Station mit einem Hochregallager, in welchem sich die Ladeplätze für die Wechselbatterien befinden. Ein Regalbediengerät entnimmt die Wechselbatterie aus dem Transportfahrzeug und gibt eine Wechselbatterie von einem Ladeplatz hinein. Das Laden kann losgelöst vom Betrieb der Fahrzeuge erfolgen. Eine andere Möglichkeit ist das Laden an einem Parkplatz mit Ladesäulen. Das Transportfahrzeug mit der Ladesäule fest verbunden und verweilt dort für die Dauer des Ladevorgangs. Je nach Auslegung der Ladeinfrastruktur des Containerterminalbetriebs kann es eine oder mehrere Batteriewechselstationen und Parkplätze mit Ladesäulen geben. Selbst die Anzahlen der Ladeplätze in einer Batteriewechselstation und der Ladesäulen in den Parkplätzen kann variieren.</p>
<p style="text-align: center;">A</p>	<p style="text-align: center;">Sofort-Tausch-Strategie</p>	<p>Es können auch Ladesäulenparkplätze und Batteriewechselstationen gemischt betrieben werden. Daher wird vorrangig betrachtet, ob eine Wechselbatterie an einem Ladeplatz fertig geladen ist. Sobald zumindest eine Wechselbatterie verfügbar ist, kann die betreffende Station aufgesucht werden.</p>
<p style="text-align: center;">1</p>	<p style="text-align: center;">Reihum-Strategie Strategie zur gleichmäßigen Auslastung (Round Robin)</p>	<p>Die Batteriewechselstation bzw. der Ladesäulenparkplatz werden von Transportfahrzeugen immer in einer festen Abfolge besucht; je nach Anzahl der Ladeplätze in den Batteriewechselstationen bzw. Ladesäulen in den Parkplätzen können diese in der Abfolge auch mehrfach vorkommen.</p>
<p style="text-align: center;">2</p>	<p style="text-align: center;">Ausgleichsstrategie Belegung Strategie zur gleichmäßigen Auslastung (Highest Vacancy)</p>	<p>Für jede Batteriewechselstation wird ermittelt, wie viele Ladeplätze von der Gesamtkapazität abzüglich der Restladedauern dortiger Wechselbatterien verfügbar sind. Anders wird für jeden Parkplatz ermittelt, wie viele Ladesäulen von der Gesamtkapazität abzüglich der Restladedauern dortiger Fahrzeugbatterien verfügbar sind. Die Tausch- bzw. Anschlussmöglichkeit, die am verfügbarsten erscheint, wird angefahren.</p>
<p style="text-align: center;">3</p>	<p style="text-align: center;">Strategie zur Reduktion der Fahrtstrecken (Nearest Spot)</p>	<p>Für jede Batteriewechselstation und jeden Ladesäulenparkplatz wird ermittelt, wie weit das betreffende Transportfahrzeug von dessen Standort entfernt ist. Die nächstgelegene Tausch- bzw. Anschlussmöglichkeit wird angefahren.</p>
	 <p style="text-align: center;">Herausgabe Wechselbatterie</p>	<p>Es können Wechselbatterien verschiedener Zellchemie und unterschiedlicher Speicherkapazität eingesetzt werden. Darum kann eine Wechselbatterie grundsätzlich zyklenfester sein als eine andere Wechselbatterie. Es kommt hinzu, dass Wechselbatterien verschiedene Alterungsgrade aufweisen können, je nachdem wann sie angeschafft und in den Batteriepool aufgenommen wurden. Schließlich können auch die Ladegeräteeinheiten an den Ladeplätzen oder die Wechselbatterien selbst unterschiedliche Lade-/Entladekapazitäten haben.</p>
<p style="text-align: center;">1</p>	<p style="text-align: center;">Strategie zum Ausgleich des Ladezustandsniveaus (Highest State of Charge)</p>	<p>Für jede Wechselbatterie wird der aktuelle Ladezustand ermittelt. Die Wechselbatterie mit dem höchsten Ladezustand wird herausgegeben. Eine weitere Spielart ist es, diese Wechselbatterie so lange zurückzuhalten, bis sie komplett geladen ist.</p>
<p style="text-align: center;">2</p>	<p style="text-align: center;">Strategie zur Maximierung der Umlaufquote (Least Recently Used)</p>	<p>Für jede Wechselbatterie wird ermittelt, wie lange sie sich bereits in der Station aufhält. Die Wechselbatterie mit dem bisher längsten Aufenthalt wird herausgegeben.</p>

 	<p>Blocklagerauswahl</p> <p>Blocklager dienen der Zwischenlagerung von Containern bevor diese auf ein Schiff geladen werden oder auf dem Landweg abtransportiert werden. Ein Lagerblock wird von zwei schienenengebundenen Portalkranen bedient. Sie verfügen über vier seeseitig angelegte Spuren, über welchen AGVs die automatisierten Blocklager erreichen können. Im Bereich der Hinterlandanbindung verfügt ein Blocklager über sechs Fahrspuren welche von Lastkraftwagen oder terminalinternen Shuttles genutzt werden können.</p>
<p>A</p>	<p>Lagerung von Spezialcontainern</p> <p>Es gibt spezielle Container wie zum Beispiel solche Container, deren Inhalt temperiert werden muss. Da es sich überwiegend um Container mit Kühlgut handelt, werden derartige Container auch gerne als Kühlcontainer bezeichnet. Sie müssen in spezielle Lagerbereiche gebracht werden, an denen einen Stromanschluss für die Kühlsysteme zur Verfügung steht. Bei der Ankunft von Schiffen werden alle zu importierenden und zu exportierenden Container erzeugt. Es richtet sich nach einer Statistik, dass einige dieser Container als Kühlcontainer gekennzeichnet werden. Bei einem Transportauftrag in Importrichtung wird geprüft, ob es sich bei dem Container um einen Kühlcontainer handelt. Falls zutreffend, kommt als Zielort nur eines der Kühlcontainerlager in Frage.</p>
	<p>Importrichtung</p> <p>Importcontainer beschreiben Container welche von einem Schiff in ein Blocklager transportiert werden. Selten können Container direkt von einem Schiff zu einem anderen Schiff transportiert werden.</p>
<p>1</p>	<p>Nahbereichsstrategie (Nearest Storage Block)</p> <p>Ausgehend vom Standort des Transportfahrzeugs auf einer Kaifahrspur, wird für jedes fragliche Blocklager die Entfernung ermittelt. Zum Beispiel sollen vier von fünf Containern in eines der Blocklager gebracht werden, die zum oberen Achtel der nächstgelegenen Blocklager gehören. Unter diesen nächstgelegenen Blocklagern wird durchaus eine Gleichverteilung angestrebt. Einer von fünf Containern soll folglich in einem der übrigen Blocklager ankommen, wobei in der Reihenfolge der Entfernung eine lineare Verteilung angewandt wird.</p>
<p>2</p>	<p>Ausgleichsstrategie Spurbelegung (Highest Vacancy)</p> <p>Wenn sämtliche Lagerspuren belegt sind, kann es geschehen, dass das Blocklager in der Importrichtung überlastet ist und wenige Exportcontainer abgegeben werden und umgekehrt. Für jedes fragliche Blocklager wird ermittelt, wie viele An-/Abfahrtsspuren belegt/reserviert sind. Eine weitere Spielart ist es, die An-/Abfahrtsspuren zweifach zu zählen, über welche Exportcontainer herausgegeben werden. Für den Importcontainer wird das Blocklager mit der niedrigsten Spurbelegung ausgewählt, welches dem betreffenden Transportfahrzeug am nächsten liegt.</p>
	<p>Exportrichtung</p> <p>Exportcontainer beschreiben Container welche Landseitig angeliefert und in einem Blocklager zwischengelagert werden, solange bis diese auf ein Containerschiff weiterverladen werden.</p>
<p>1</p>	<p>Nahbereichsstrategie (Nearest blockarea to berth)</p> <p>Über den Landweg angelieferte Exportcontainer werden den Blocklagern zugeordnet. Diese befinden sich gegenüber dem voraussichtlichen Liegeplatz des Zielschiffs. Hierdurch werden die Container gleichmäßig auf die betreffenden Blocklager verteilt.</p>

2.2.2.2 Verfeinerung der Modelle des Energieverbrauchs

An zwei verschiedenen Containerbrücken (einer Brücke für Zubringerschiffe und einer Brücke für Post-Panamax-Schiffe) wurden im Rahmen der Flottenversuche im Container Terminal Altenwerder Betriebs- und Energiedaten aufgezeichnet. Neben den Fahrzeugauftragsdaten der Transportfahrzeuge wurde ein besonderer Fokus auf den Containerbrücken- und den Blocklagerbereich gelegt.

Zur Validierung und Verbesserung des Simulationsmodells wurden zum Beispiel Umschlagsdaten gesammelt. Aus diesen Aufzeichnungen gingen Datenblätter mit dem in Abbildung 13 gezeigten Tabellenformat hervor. In einem ersten Schritt wurden Durchschnittswerte für die benötigte Umschlagszeit eines Containers und die dafür benötigte elektrische Leistung bestimmt. Die Berechnung erfolgte sowohl für eine Containerbrücke als auch für ein Blocklager. Ein Durchschnittswert kann durch vorhandene Ausreißer im Datenbestand erheblich von einer tatsächlich gemessenen Umschlagsdauer abweichen. Aus diesem Grund wurden in einem zweiten Schritt Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die benötigte Umschlagsdauer eines Containers sowie den damit verbundenen Energieverbrauch erstellt.

Jahresschiffsnummer							Energieverbrauch [kWh]			
Stunde										
Containernummer	Leer-Voll-Merkmal	Verkehrsrichtung	Größe	OOG-Merkmal	IMO-Merkmal	Umschlagszeit HK	Umschlagszeit PK			
Spalte1	Spalte2	Spalte3	Spalte4	Spalte5	Spalte6	Spalte7	Spalte8	Spalte9	Spalte10	
						[mm:ss]	[min]	[mm:ss]	[min]	
04.06.2014 17:00						... ,367				
TCNU 53	Voll	Löschen	40'	Nein	Nein	01:..	1,..	01:..	1,..	
TCKU 45	Voll	Löschen	40'	Nein	Nein	01:..	...	0 ...	1,..	
TR. . 936	Voll	Löschen	20'	Nein	Nein	01:..4	2,..	
04.06.2014 18:00						... ,206				
CLH 970	Voll	Löschen	40'	Nein	Ja	01:..	...2	...7	1,..	
H. . . . 4 6	Voll	Löschen	40'	Nein	Ja	01:..6	1,..	
TCL 7	Voll	Löschen	40'	Nein	Ja	01:..	...	01:..	...2	

Abbildung 13: Auszug der Datenerfassung der Containerbrücke 2

In Tabelle 5 wird ein Überblick zu den in der Lastgangsimulation direkt berücksichtigten Verbrauchsbereichen des Containerterminals gegeben. Dort werden auch die Bearbeitungszeit- und Leistungsaufnahmeparameter genannt, die in den jeweiligen Verbrauchsbereichen eine bedeutende Rolle spielen und für die Schwankungen im simulierten Viertelstundenverbrauch des Containerterminals verantwortlich sind. An passenden Stellen sind zudem die Auswertungsergebnisse nach der Datenerhebung aus den Flottenversuchen und die relevanten Modelleinstellungen mit aufgeführt.

Tabelle 5: Übersicht der zu verwendenden Methoden zur Bestimmung von Umschlagszeiten und Leistungsaufnahmen in den verschiedenen Bereichen der Logistiksimulation

Nr.	Verbrauchsbereich	Kurzbeschreibung	
	Containerbrücken	Die eingesetzten Zwei-Katz-Containerbrücken im CTA können in drei Bereiche unterteilt werden. Eine Hauptkatze, eine Laschplattform und eine Portalkatze. Die Hauptkatze dient dazu Container von einem Containerschiff zu löschen oder diese auf das Schiff zu laden. Bei einem Löschvorgang wird dabei ein Container vom Schiff auf die Laschplattform der Brücke transportiert. Bei einem Beladevorgang wiederum wird ein Container von der Laschplattform auf das Schiff bewegt. Die Portalkatze dient dazu Container von einem AGV auf die Laschplattform zu transportieren oder einen Container von der Laschplattform auf ein AGV zu bewegen. Die Laschplattform in der Mitte der Containerbrücke dient somit als Entkopplungspunkt der beiden Kranteile. Sie kann maximal zwei Container aufnehmen.	
		Hauptkatze	Die Hauptkatze stellt den seeseitigen Aufbau der Containerbrücke dar.
		① Durchschnittswert	Hierbei wird ein Durchschnittswert für die benötigte Umschlagszeit und den auftretenden Energieverbrauch festgelegt. Diese Werte gelten jeweils für den Transport eines Containers vom Schiff auf die Laschplattform oder von der Laschplattform auf ein Schiff. Hierbei wird zwischen einem Feederschiff und einem Seeschiff unterschieden, da signifikante Unterschiede in der benötigten Umschlagszeit, sowie dem Energieverbrauch festgestellt wurden.
		② Wahrscheinlichkeitsverteilungen	Es wurden Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die zu erwartende Containerumschlagszeit sowie deren Energieverbrauch erstellt. Für die Ermittlung der Umschlagszeit wurde eine Intervallskala in fünf Sekunden Schritten erstellt und die Anzahl der Containerumschläge in diesem Zeitintervall gezählt. Aus diesen Daten wurde anschließend eine Häufigkeitsverteilung generiert. Für die Erstellung der Häufigkeitsverteilungen für den Energieverbrauch beim Umschlag eines Containers wurde eine Intervallskala mit einem Abstand von einer Kilowattstunde gewählt.
		Portalkatze	Die Portalkatze stellt den landseitigen Aufbau der Containerbrücke dar.
		① Durchschnittswert	Hierbei wird ein Durchschnittswert für die benötigte Umschlagszeit und den auftretenden Energieverbrauch festgelegt. Diese Werte gelten jeweils für den Transport eines Containers vom Schiff auf die Laschplattform oder von der Laschplattform auf ein Schiff.
		② Wahrscheinlichkeitsverteilung	Es wurden Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die zu erwartende Containerumschlagszeit sowie deren Energieverbrauch am Portalkran teil erstellt.
	Lagerkräne	Portalkräne sind für die Ein- und Auslagerung der Container in ein Blocklager verantwortlich. Sie fahren hierfür auf neben dem Blocklager befindlichen Schienen. Je zwei bedienen einen Lagerblock. Durch ihre unterschiedlichen Höhen können sie unabhängig voneinander einen Block bedienen. Dazu fahren die Kräne unter – bzw. übereinander her. Für die Ein- oder Auslagerung eines Containers wird eine bestimmte Zeit benötigt und während dieser Zeit elektrische Leistung aufgenommen.	
		① Durchschnittswert	Hierbei wird ein Durchschnittswert für die benötigte Umschlagszeit und den auftretenden Energieverbrauch festgelegt. Diese Werte gelten jeweils für die Ein- oder Auslagerung eines Containers.
		Prozentualer Anteil von Umstaplern pro Ein- und Auslagerungsvorgang	Für die Ein- und Auslagerung eines Containers ist es teilweise notwendig Container im Lager umzustapeln, um an darunterliegenden Container zu gelangen. Es wurde ein Faktor bestimmt wie viele Umstapler für einen durchschnittlichen Ein- oder Auslagerungsvorgang benötigt werden. Zusammen mit der durchschnittlich benötigten Zeit eines Umstaplers können diese stochastisch im Simulationsmodell generiert werden.
		② Wahrscheinlichkeitsverteilung	Es wurden Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die zu erwartende Containerumschlagszeit sowie deren Energieverbrauch am Lagerkran erstellt.

	Kühlcontainer	<p>Jeder Kühlcontainer verfügt über eine konstante Leistungsaufnahme, sobald sich dieser an seiner endgültigen Position im Blocklager befindet.</p>
1	Ein- und Auslagerung von Spezialcontainern anhand der Lade- und Löschlisen	Die Kühlcontaineranzahl erhöht bzw. vermindert sich mit der Be- Und Entladung der Schiffe. Dazu werden Import- und Exportcontainer eines Containerschiffes als Kühlcontainer anhand der Informationen der Lade- und Löschlisen generiert.
2	Stochastische Ein- und Auslagerung von Spezialcontainern	Die Kühlcontaineranzahl erhöht bzw. vermindert sich mit der Be- Und Entladung der Schiffe. Dazu werden prozentual Import- und Exportcontainer eines Containerschiffes als Kühlcontainer anhand eines Fixwertes generiert. Diese Methode wird dann verwendet, wenn keine Angaben über Anzahl der zu Löschlenden und zu Ladenden Kühlcontainer eines Containerschiffes vorliegen.
	Basisbestand an zu temperierenden Containern	Zu Beginn der Simulation wird ein fester Basisbestand von Kühlcontainern gewählt, die sich bereits im Lagerbereich des Betriebsgeländes befinden. Idealerweise kann hier auf die Daten des Terminalleitsystems zurückgegriffen werden, um eine realistische Startgröße zu erreichen.
	Industriebeleuchtung	Für die Beleuchtung im Außenbereich wird in Abhängigkeit vom Sonnenlicht von einem konstanten Energieverbrauch ausgegangen. Es wird dabei zwischen dem Verbrauch am Tage und dem Verbrauch in der Nacht unterschieden. Zum Sonnenaufgang bzw. Sonnenuntergang wird der Energieverbrauchswert innerhalb einer Dreiviertelstunde um drei Stufen gesenkt bzw. erhöht.
1	Sonnenaufgangs- / Sonnenuntergangszeitpunkte	Die Zeiten für Sonnenauf- und Untergang wird über das Datum durch eine mathematische Zeitgleichung bestimmt.
	Basisverbrauch	Unter dem Basisverbrauch werden all die Verbraucher zusammengefasst, welche unabhängig von den Umgebungsbedingungen ständige Verbraucher sind. Hierzu zählen z.B. Beleuchtungsanlagen, welche aus Sicherheitsgründen permanent in Betrieb sind.
1	Konstanter Energieverbrauch	Der Basisenergieverbrauch ist konstant und das ganze Jahr gleich hoch. Er unterliegt keinen Saisonalen Schwankungen.

Um im Zuge des Feldtests die Auswirkungen der bewegten Massen besser bewerten zu können, wurden typische Gewichtsverteilungen der durchgeführten Transporte ermittelt. Zu den in Abbildung 14 dargestellten Containermassen wären das Gewicht des Fahrzeugs und der jeweils eingesetzten Wechselbatterie hinzuzurechnen.

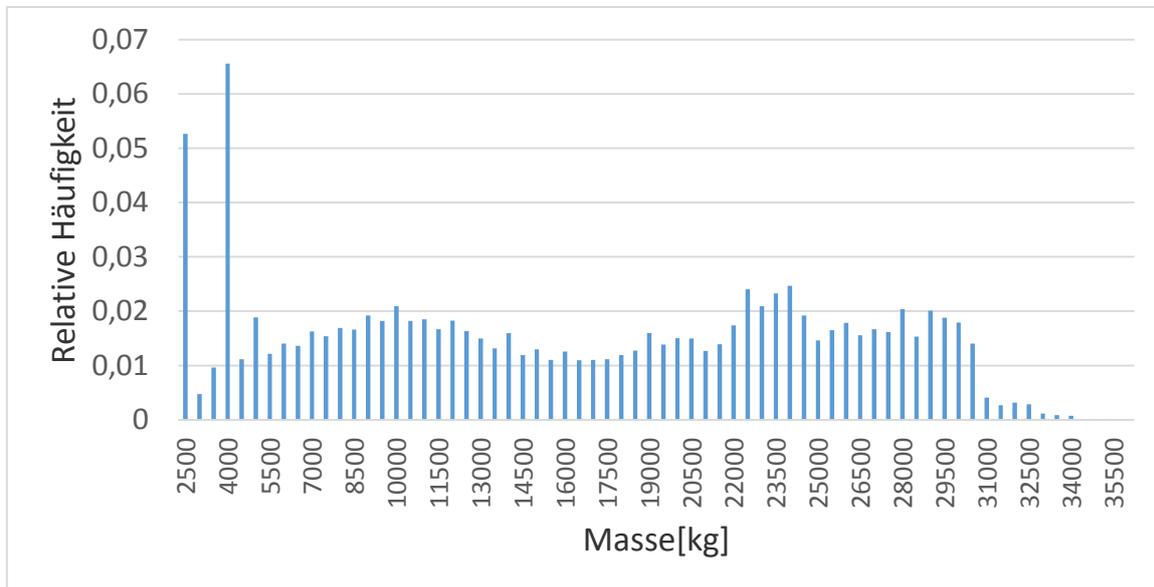


Abbildung 14: Verteilung der Containermassen

Ein besonderes Augenmerk galt der Ermittlung der Energieverbräuche in Korrelation zur umgeschlagenen Containermenge. In aufwändigen Messungen mit speziellen, in die Energiezuführungen der unterschiedlichsten Umschlagsgeräte eingebauten Messgeräten, wurden die detaillierten Stromverbräuche für B-AGVs, Bahnkrane, Kaikrane und Lagerkrane ermittelt. Ferner wurden Grundlasten (Betriebsgebäude, Beleuchtung) und mengenabhängige Sonderbedarfe wie z.B. der Strombedarf für Kühlcontainer ausgewertet. Diese Daten gelten als eine der Grundvoraussetzungen für die Simulation und die weiteren forschungsseitig entwickelten Methoden zur Lastgangprognose. Die Abbildung 15 zeigt den aufgezeichneten Stromverbrauch im Verhältnis zur umgeschlagenen Anzahl von Containern.

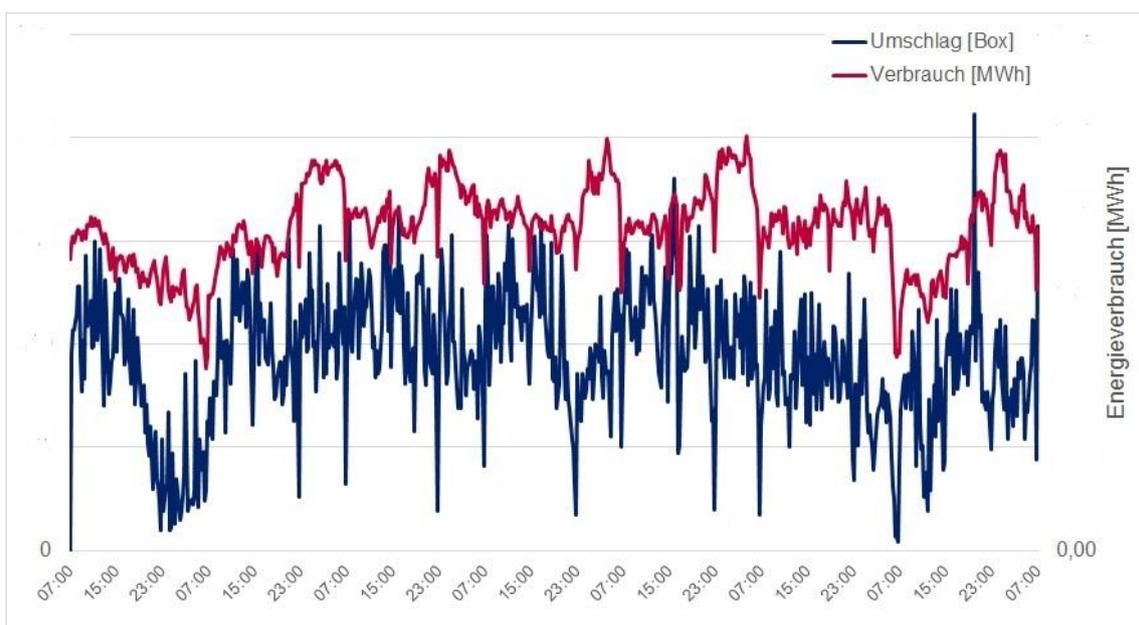


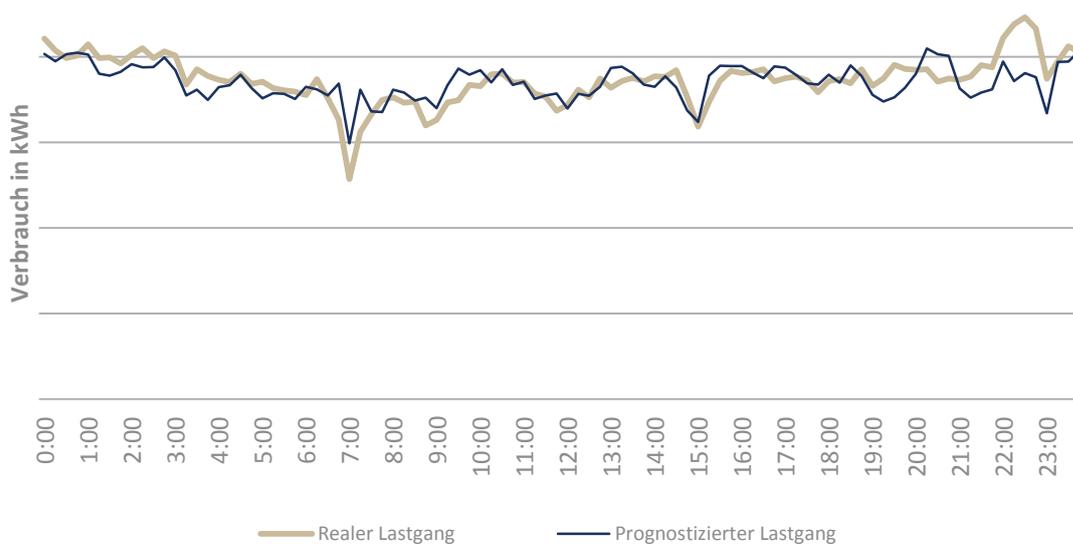
Abbildung 15: Mitgeschriebene Viertelstundenwerte für Energieverbrauch und Umschlagsleistung

2.2.3 Entwicklung eines simulationsbasierten Verfahrens zur Lastgangvorhersage

Eine Besonderheit des im BESIC-Projekt entwickelten Simulationsmodells besteht darin, dass die Logistikabläufe integriert mit den Energieverbräuchen betrachtet werden können. Damit können unter anderem die Abhängigkeiten zwischen dem allgemeinen Logistikgeschehen und dem Energiebereitstellungsgeschehen für die batteriebetriebenen Transportfahrzeuge aufgedeckt werden. Für eine genauere Vorhersage des Gesamtverbrauchs eines Containerterminalbetriebs ist das Simulationsmodell rudimentär um die Seite der Hinterlandanbindung erweitert worden. Der Abtransport und die Zuführung von Containern über das Hinterland haben einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf den Gesamtverbrauch des Containerterminals. Ebenso werden die Lagerkräne durch den Hinterlandverkehr zusätzlich ausgelastet, was sich auf das Beladen und das Entladen von Fahrzeugen im wasserseitigen Horizontaltransportareal auswirkt und somit den Arbeitsrhythmus der Transportfahrzeuge beeinträchtigt.

Die Logistikabläufe auf der Wasserseite werden maßgeblich durch die Vorbereitung auf die Ankunft eines Containerschiffes, die Abfertigung eines Containerschiffes und gegebenenfalls die Nachbereitung bestimmt. Für einen Simulationslauf stehen recht genaue Informationen zum geplanten Schiffsankunftszeitpunkt, dem Zeitpunkt für den Arbeitsbeginn an diesem Containerschiff, etc. sowie die Anzahlen der Container in Import- und Exportrichtung zur Verfügung. Es ist zu beobachten, dass größere Containerschiffe im Abstand einiger Wochen wiederkehren. Die Logistikabläufe auf der Hinterlandseite werden durch den Abtransport und das Heranbringen von Containern mit Bahn- und Lastkraftwagen bestimmt. Das Eintreffen der Wagen wird nicht ausreichend vorangekündigt, als dass für einen Simulationslauf belastbare Informationen verfügbar gemacht werden könnten. Aus diesem Grund wurde darauf verzichtet, in der Simulationskomponente eine Eingabemöglichkeit für Informationen aus der Terminalbetriebssoftware bezüglich des Hinterlandverkehrs aufzubauen.

Die **Abbildung 16** zeigt ein exemplarisches Simulationsergebnis für einen Referenztag aus dem Jahr 2013. Im Liniendiagramm sind die Viertelstundenverbräuche in den einzelnen Verbrauchsgruppen wie zum Beispiel den Containerbrücken, etc. sowie der vorhergesagte Gesamtlastgang (rot) eingezeichnet. Zusätzlich wurde der am Referenztag tatsächlich gemessene Gesamtenergieverbrauch (blau) eingefügt.



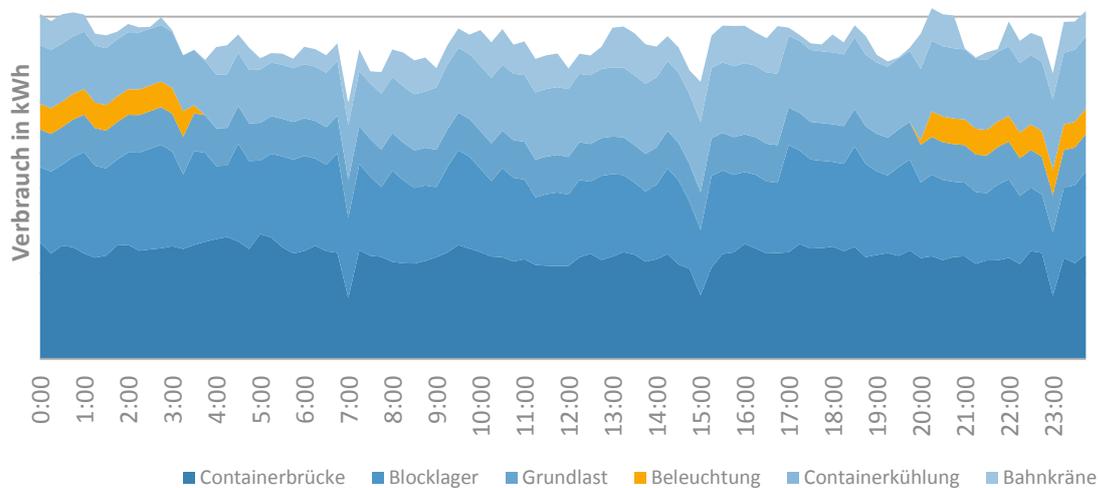


Abbildung 16 Liniendiagramm mit dem Simulationsergebnis für einen Referenztag aus 2013 im Vergleich mit dem tatsächlich gemessenen Energieverbrauch

Um die Güte der simulationsbasierten Lastgangvorhersage zu bewerten wurden die Simulationsergebnisse an 353 Tagen des Jahres 2013 mit den Ergebnissen eines Vergleichstagsverfahrens (VTV) auf Viertelstundebasis verglichen. Bei der Verwendung eines Vergleichstagsverfahrens wird der Lastverlauf eines historischen Referenztages zur Prognose genutzt. Durch die Berücksichtigung mehrerer Vergleichstage tritt ein statistischer Mittelungseffekt ein, der eine hinreichend präzise Prognose der benötigten Energiemengen ermöglicht. Es erweist sich immer dann als möglich, wenn wiederkehrende Verbrauchsprozesse stattfinden.

In der Abbildung 17 werden die Vorhersageergebnisse des simulationsbasierten Verfahrens auf monatlicher Basis mit den Vorhersageergebnissen des Vergleichstagsverfahrens gegenübergestellt. Dabei sei nochmal angemerkt, dass für jeden Tag des Monats eine einzelne Lastgangvorhersage durchgeführt wurde. In dem Diagramm mit den gruppierten Säulen sind die Durchschnittswerte des mittleren absoluten prozentualen Fehlers (engl. Mean Average Percentual Error, kurz MAPE) der Lastgangvorhersagen für die einzelnen Tage des Monats angegeben.

Mit Hilfe des Simulationsmodells kann in jedem Monat des Jahres 2013 durchschnittlich ein besseres Vorhersageergebnis als mit dem Vergleichstagsverfahren erzielt werden. In das VTV gehen die Tage mit dem gleichen Wochentag der sechs vorausgegangenen Wochen ein. Über das Gesamtjahr liegt das simulationsbasierte Verfahren bei einem MAPE von 8,4 und das VTV bei einem MAPE von 10,4. Damit ist es glatte 2 Prozentpunkte besser zur Vorhersage geeignet als das VTV.

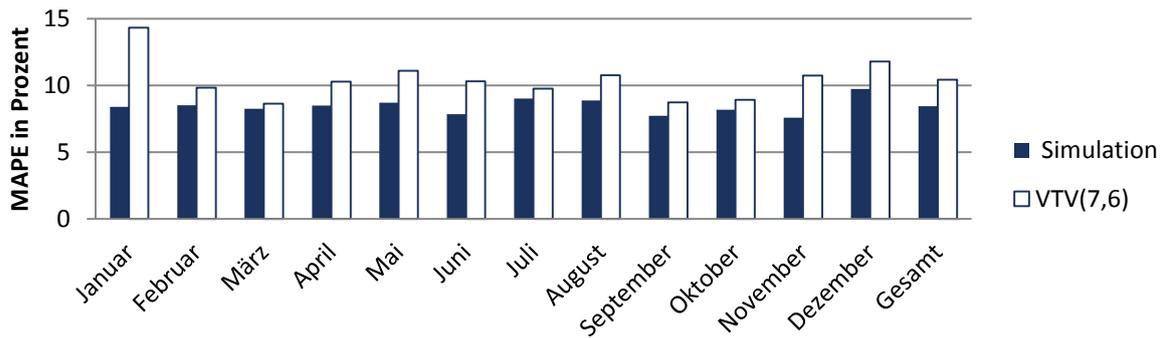


Abbildung 17 Balkendiagramm mit durchschnittlichem MAPE für die Simulationsergebnisse im Vergleich mit den Ergebnissen eines VTV auf Monatsbasis

Während die Durchschnittswerte des MAPE monatsweise noch nahe beieinander liegen, gehen in **Abbildung 18** die Maximalwerte des MAPE doch recht weiter auseinander. Dies lässt auf eine größere Standardabweichung beim Vergleichstagverfahren schließen. Der Maximalwert des MAPE wird beim simulationsbasierten Verfahren mit 26,1 Prozentpunkten im Monat August erreicht; der Maximalwert des MAPE beim VTV liegt hingegen bei 48,9 Prozentpunkten im November beinahe doppelt so hoch.

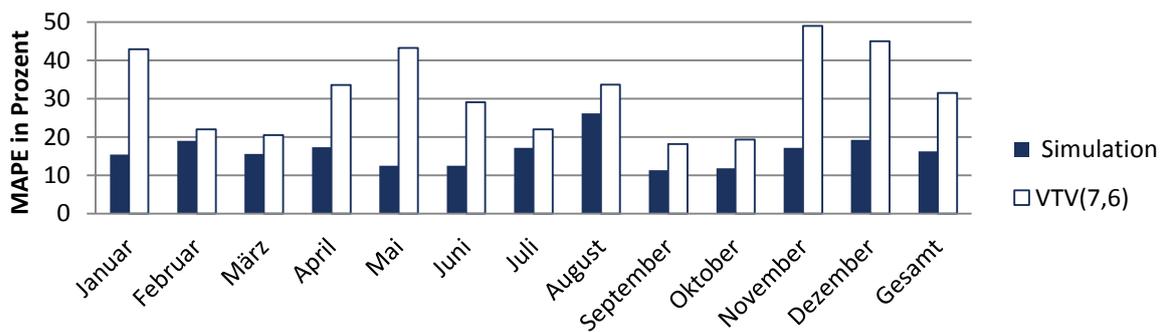


Abbildung 18 Balkendiagramm mit maximalem MAPE für die Simulationsergebnisse im Vergleich mit den Ergebnissen eines VTV auf Monatsbasis

Da der durchschnittliche MAPE sowie auch der Maximale MAPE der Simulationsergebnisse in jedem Monat niedriger ist als die Werte des Vergleichstagverfahrens ist es auffallend, dass bei der Betrachtung des minimalen MAPE pro Monat durchweg das Vergleichstagverfahren bessere Ergebnisse erzielt. Lediglich im Monat Januar trifft dieser Fall nicht ein. Die **Abbildung 19** zeigt den minimalen MAPE der Monate Januar bis Dezember.

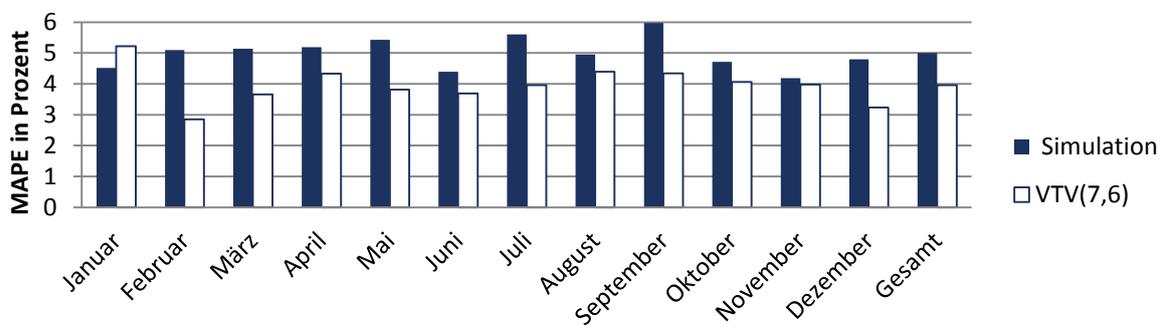


Abbildung 19 Balkendiagramm mit minimalem MAPE für die Simulationsergebnisse im Vergleich mit den Ergebnissen eines VTV auf Monatsbasis

Wesentlich bessere Ergebnisse als das Vergleichstagverfahren erzielte das simulationsbasierte Verfahren im Bereich der Vorhersage der Wendepunkte im Lastgangverlauf. Im Mittel wurden 52 % der Wendepunkte durch

das simulationsbasierte Verfahren korrekt vorhergesagt während durch das Vergleichstaggerfahren lediglich 14 % der Wendepunkte korrekt vorhergesagt wurden. Die **Abbildung 20** vergleicht die Determinationskoeffizienten (Wendepunktfehler) der beiden Verfahren für die Monate Januar bis Dezember.

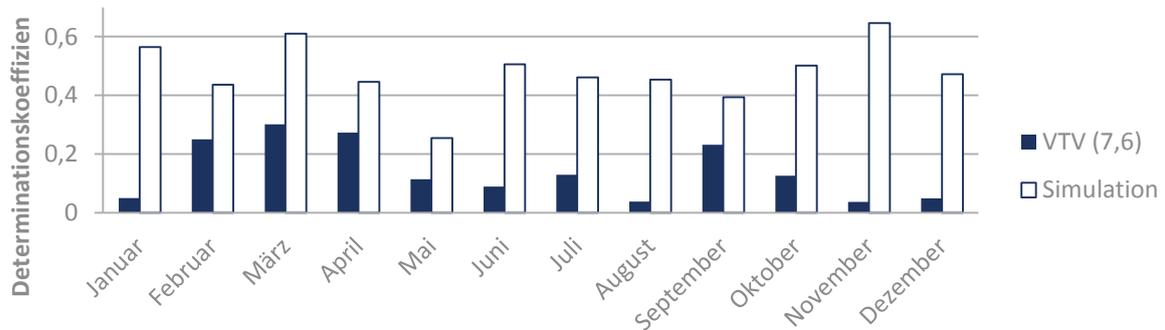


Abbildung 20 Balkendiagramm mit Determinationskoeffizienten für die Simulationsergebnisse im Vergleich mit den Ergebnissen eines VTV auf Monatsbasis

2.2.4 Entwicklung einer Simulationskomponente zur Vorhersage der Transportlasten

In der Praxis tragen simulationsbasierte Vorhersageergebnisse entscheidend dazu bei, dass die Ladeprozesse der Wechselbatterien am Vortag geplant und dann auf Abruf gesteuert werden können.

Es bietet sich an, die Erstellung eines Ablaufplans täglich wiederkehrend um 08:00 Uhr des Tags voraus anzustoßen, damit die Fristen des Wirk- und Regelleistungsmarkts gewahrt und energiewirtschaftliche Geschäfts-/Anwendungsfälle (siehe auch unter Identifikation energiewirtschaftlicher Geschäfts-/Anwendungsfälle) verwirklicht werden können. Gegenwärtig müsste ein dem Containerterminal übergeordneter Betreiber eines virtuellen Kraftwerks die Angebote für Minutenreserve bis 10:00 Uhr in einer Tagesausschreibung platzieren. Ein Stromhändler/-lieferant müsste bis 14:30 Uhr eine Fahrplannominierung durchführen, was als vorentscheidend für dessen Engagement im tagaktuellen Handel anzusehen ist.

- Das betriebliche Energie-Management-System (EMS) übernimmt jeweils Tags voraus die energiewirtschaftliche Ablaufplanung und stößt die Vermarktung von Minutenreserve gegenüber einem übergeordneten Aggregator an. Am Geltungstag selbst sorgt es für eine planmäßige Durchführung der Ladeprozesse und koordiniert im Falle eines Abruf zur Erbringung von Regelernergie die Schalthandlungen gemäß der reservierten Zuschalt-/Abschaltpotenziale und übermittelt die zum Nachweis erforderlichen Messdaten nach außen.
- Die Terminalbetriebssoftware (engl. Terminal-Operating-System, kurz TOS) bietet eine Softwareunterstützung für die Aufgaben auf den Ebenen der kaufmännischen Planung und der alltäglichen Einsatzplanung. Dazu zählen unter anderem die Liegeplatzzuweisung und die Zuordnung von Containerbrücken für die Schiffe sowie die Einteilung von Bedienpersonal an den Kränen.
- Das Batterien-Verwaltungs-Systems (BVS) dient der Sammlung von Statusinformationen über die umlaufenden Wechselbatterien sowie der Überwachung der Ladeprozesse in der Station und des Fahrbetriebs der batterie-elektrischen Fahrzeuge. Zudem erkennt es den Bedarf für einen Batteriewechsel und stößt ggf. eine Ausfahrt eines Transportfahrzeugs zur Station an.

Das EMS wurde neben einer Ablaufplanungskomponente auch um eine Komponente für Logistiksimulation erweitert. Mit Hilfe von Simulation können die für eine Vortagsplanung notwendigen Eingabedaten gewonnen werden. Zum einen muss von Tag zu Tag die Transportlast vorhergesagt werden, welche im Verlauf des Planungszeitraums auf die individuellen batterie-elektrischen Fahrzeuge entfällt. Zum anderen kann vorausgesehen

werden, welche Standorte und Ladezustände die Wechselbatterien zu Anfang des Planungszeitraums haben werden. Unter Standortinformationen sind die Belegung der Ladestellen mit Wechselbatterien und die Zuordnung von Wechselbatterien an Bord von Fahrzeugen zu verstehen.

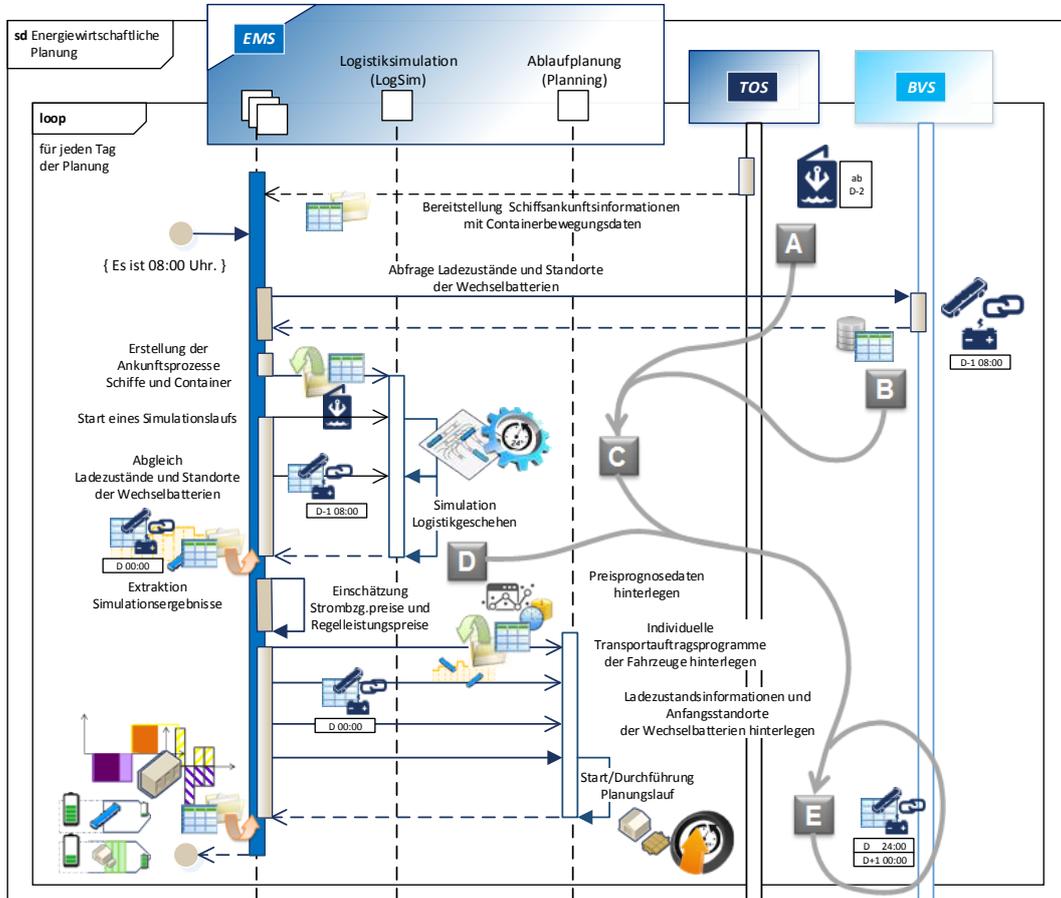


Abbildung 21 Sequenzdiagramm über die Ablaufplanerstellung mit Simulationsvorlauf in der Praxis

In **Abbildung 21** wird das Zusammenwirken der drei Teilsysteme bei der Erstellung eines Ablaufplans mit Simulationsvorlauf dargestellt:

- A** Über entsprechende Meldungen der Reedereien werden dem TOS grundlegende Informationen über die vermeintliche Ankunftszeit der Containerschiffe und deren Lade-/Löschlisten zur Verfügung gestellt. Einige größere Seeschiffe, insbesondere die auf festen Überseerouten, erreichen den Containerterminal beinahe fahrplanartig. Kleinere Zubringerschiffe verkehren hingegen in unregelmäßiger Weise zwischen verschiedenen Containerterminals. Auf Basis dieser Informationen wird eine Schiffsankunftsliste erstellt und die Anzahlen der zu ladenden und zu löschen Container annotiert. Diese Liste kann in einem Tabellenformat vom TOS bereitgestellt und in die Logistiksimulation **ab D-2** vorgegeben werden. Es werden Informationen über sämtliche Schiffsankünfte ab zwei Tagen vor dem Planungszeitraum benötigt, um auch die Abfertigung von Containerschiffen innerhalb des Planungszeitraums simulieren zu können, die bereits vor Beginn des Planungszeitraums eintreffen.
- B** Die im Einsatz befindlichen Wechselbatterien kommunizieren in regelmäßigen Abständen Statusinformationen an das BVS wie zum Beispiel ihren Standort, den prozentualen Ladezustand, die Batteriesystemtemperatur, ggf. den Elektrolytstand und so weiter. Zusätzlich werden von den Ladegeräteeinheiten in der Station gewisse Statusinformationen wie beispielsweise die Verfügbarkeit, der aktuelle Ladestrom, aktuelle Ladespannung, aktuelle Ladeleistung, die verstrichene Zeit im Ladevorgang, die geschätzte ver-

bleibende Zeit zur Beendigung des Ladevorgangs und so weiter an das BVS übermittelt. All diese Statusinformationen werden in einer Datenbankanwendung abgelegt und können über eine Weboberfläche zum Zeitpunkt **D-1 08:00** abgefragt/dargestellt werden.

- C** In der Logistiksimulation werden hauptsächlich die Containerbewegungen beim Entladen und Beladen der Schiffe mit Kaikränen, beim Horizontaltransport zwischen Kaimauer und Blocklager in beiden Richtungen und die Ein-/Auslagerung mit Portalkränen betrachtet. Ein Simulationslauf reicht von **D-2 bis D**. Sobald im Simulationslauf der entsprechende Modellzeitpunkt erreicht ist, muss der Simulationsstand an die tatsächlichen Statusinformationen der Realwelt **D-1 08:00** angeglichen werden. Anschließend wird mit dem Simulationslauf fortgefahren und zum Modellzeitpunkt **D 00:00** bezüglich der Standorte und Ladezustände der Wechselbatterien ein Schnappschuss des Simulationsstands gemacht. Im Simulationsmodell sind realistische Verteilungen der Umschlagszeiten hinterlegt und der Fahrkurs exakt nachgebaut. Zu Vorhersagezwecken können die Start- und Endzeiten einer Bearbeitung von Transportaufträgen im Zuge eines Simulationslaufes aufgezeichnet werden. Auf diese Weise lässt sich die Transportlast von Fahrzeuggruppen bis hin zu einzelnen Fahrzeugen im Verlauf des Planungszeitraums vorhersehen/einschätzen.
- D** Es werden die Markträumungspreise der letzten Vortagshandelszeiträume abgerufen und daraus mögliche Bezugspreiskonditionen für den Containerterminalbetrieb prognostiziert. Es werden die mittleren erzielten Leistungspreise der zurückliegenden Tagesausschreibungen für Minutenreserve abgerufen und daraus mögliche Leistungspreiskonditionen für den Containerterminalbetrieb prognostiziert.
- E** Abschließend wird eine energiewirtschaftliche Ablaufplanung durchgeführt. Falls sich gerade ein Ablaufplan in Ausführung befindet und er als zutreffend herausgestellt hat, sollten sich bis zum kommenden Tag die Standorte und die Ladezustände der Wechselbatterien plangemäß entwickeln. Dann stellen die Planungsergebnisse am Ende des Planungszeitraums **D 24:00** die Vorgaben für den kommenden Tag dar **D+1 00:00**. Anderenfalls es bei Ausführung eines Ablaufplans zu Abweichungen gekommen ist oder ohnehin mit der Ablaufplanung neu angesetzt werden muss, können nur die Simulationsergebnisse zur Hochrechnung der Ladezustände der Wechselbatterien sowie als Anhaltspunkt für deren Standort dienen.

In der **Abbildung 22** wird nochmals verdeutlicht, wie ein Simulationsvorlauf zur Vorhersage der Transportlast durchgeführt wird. Mit den Daten aus der sogenannten Segelliste und die annotierten Containerbewegungsdaten wird ein Simulationslauf gegen 08:00 Uhr am Vortage initialisiert. Durch die Einträge der Segelliste werden die Ankünfte und die Abfertigung von Containerschiffen angezeigt, welche wenige Tage zurückliegen und bis zu zwei Wochen in der Zukunft liegen. Je nachdem wie weit die Segellisteneinträge zurückreichen, wird der Simulationszeitraum also ein oder zwei Tage **D-3** **D-2** abdecken, die noch vor dem Tage liegen, an welchem der Simulationslauf an sich gestartet wird. Dies geschieht, um in der Modellwelt eine realistische Belegung der Schiffsliegeplätze und damit der Auslastung des Containerterminals herzustellen. Ist die Simulationszeit so weit vorangeschritten, dass die Modellzeit der Realzeit entspricht, so wird ein Datenabgleich vorgenommen. Denn die Modellwelt ist aufgrund des stets gleichen Initialisierungszustands gewissermaßen von dem Zustand in der Realwelt entrückt. Nur kurze Zeit nach dem Start des Simulationslaufes werden also vom **BVS** die Standorte und die Ladezustände der Wechselbatterien abgefragt und dann die Modellwelt daraufhin von der Komponente **LogSim** umgestellt. Bei dieser Umstellung werden die Simulationsobjekte für die Wechselbatterien an die Bausteine ver-

bracht, welche ihre tatsächlichen Standorte an den Ladestellen oder an Bord eines Fahrzeugs repräsentieren. Von diesem Zeitpunkt an ist die Simulation somit vollständig initialisiert und es kann der Vortag D-1 realitätsnah zu Ende simuliert werden. An der Taggrenze geht der Simulationszeitraum zum Geltungstag der energiewirtschaftlichen Ablaufplanung über. Die Simulation liefert hierfür nun nicht allein die Transportlast im Verlauf des kommenden Tages, sondern auch die Ladezustände und die Belegung der Ladestellen in der Station zu Beginn des Planungszeitraums. Ehe die Komponente **LogSim** ab der Taggrenze mit der Simulation fortfahren lässt, wird ein Schnappschuss der Belegung der Ladestellen und der Ladezustände in der Modellwelt angefertigt und für die Komponente der energiewirtschaftlichen Ablaufplanung hinterlegt. Die Vorhersage der Transportlast mittels Simulation geschieht dann darauffolgend, indem die Simulation bis zum Ende des kommenden Tages D weiterläuft. Während der Simulation werden die von den Fahrzeugen abgearbeiteten Transportaufträge aufgezeichnet und werden der energiewirtschaftlichen Ablaufplanung als individuelle Transportauftragsprogramme zur Verfügung gestellt.

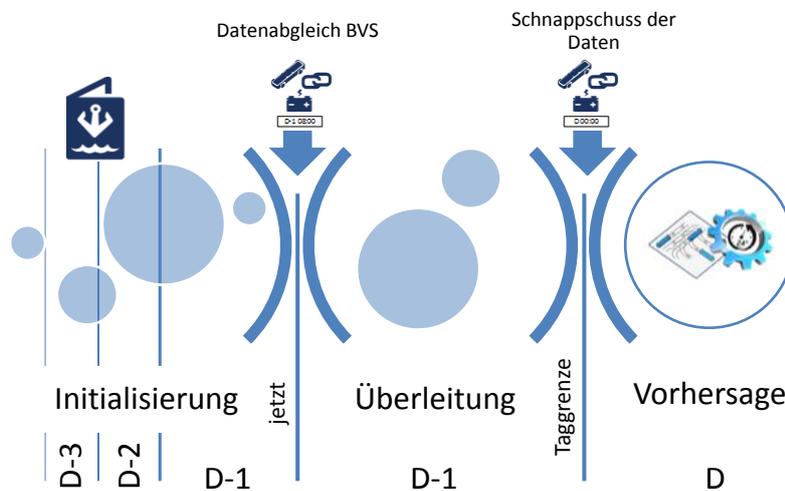


Abbildung 22: Ablauf für die Vorhersage von Transportlast mit Hilfe von Simulation

Die individuellen Transportauftragsprogramme werden in der Ablaufplanung berücksichtigt. Entsprechend der im Zeitverlauf vorgesehenen Transportlast muss die Entladeleistung festgelegt werden, ansonsten wäre diese planerisch nicht abgedeckt. In der **Abbildung 23** wird ein Überblick zu den Ergebnissen der energiewirtschaftlichen Ablaufplanung und der Ausführung eines vorliegenden Ablaufplans gezeigt. Die blaue Linie stellt dabei den aus den festgelegten Entlade-/Ladeleistungen resultierenden geplanten Ladezustandsverlauf dar. Die jeweils aus dem Verlauf der erforderlichen Transportleistung herrührende Entladeleistung ist durch rote Balken eingezeichnet; die für den Stationsaufenthalt einer Wechselbatterie gewählte Ladeleistung ist in grünen Balken markiert. Die rote Linie stellt die tatsächliche Ladezustandsentwicklung dar, wie sie vom BVS zentral erfasst und während der Ablaufplanausführung abgefragt worden ist. Der vertikale graue Balken kennzeichnet, inwieweit die Zeit bei der Ausführung des Ablaufplans fortgeschritten ist. Wie sich in der Ladezustandsentwicklung der Wechselbatterien AD_001, AD_002 und weiteren erkennen lässt, entwickeln sich die Ladezustände mitunter sprunghaft bzw. es gibt vorübergehende Fehleinschätzungen zum Ladezustandswert, was unter anderem die Folge von veränderten Batteriesystemtemperaturen sein kann. Bei den Wechselbatterien AD_003, AD_004, AD_005 und AD_011 konnte der abnehmende Verlauf beim Ladezustand ziemlich gut vorhergesehen werden; jedenfalls sieht die Abnahmerate grundsätzlich stimmig aus. Eine genauere Hinsicht verrät allerdings, dass zum Beispiel bei AD_004 der Zeitpunkt für den Batteriewechsel um knapp sechs Stunden verpasst worden ist. Dies macht deutlich, dass der zeitliche Spielraum für die Festlegung des Ladeverlaufs während des Aufenthalts enger gezogen werden müsste. Bei der Wechselbatterie AD_011 ist der Ladeblock recht spät gewählt worden, so dass dieser entspre-

chend eingeleitet werden konnte. Ansonsten kann es wie bei AD_005 geschehen, dass laut Plan ein Ladeblock ansteht, obwohl die Wechselbatterie tatsächlich noch an Bord eines Fahrzeugs unterwegs ist.

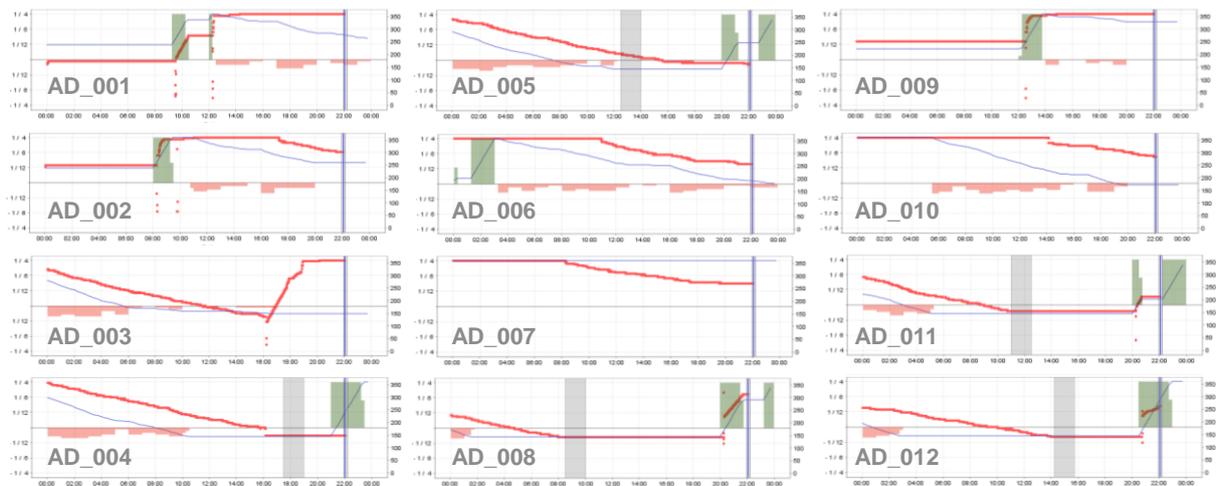


Abbildung 23: Galerie mit den vom 06.10.2015 geplanten Ladezustandsverläufen sämtlicher Wechselbatterien

Die Wechselbatterie AD_010 hatte die Station dagegen in der Tat erst etwa sechs Stunden später verlassen als es geplant war; dieser zeitliche Spielraum war somit nicht berücksichtigt worden. Bei der Wechselbatterie AD_007 war davon ausgegangen worden, dass sie sich durchgehend an einer Ladestelle in der Station aufhalten würde. Tatsächlich war diese allerdings gegen 08:00 Uhr von einem Fahrzeug aufgenommen und seither teilweise entladen worden.

Insgesamt lässt es sich so sehen, dass es eher gegen Ende als zu Beginn des Vorhersagehorizonts zu abweichenden Ladezustandsentwicklungen kommt. Erfreulicherweise sind insbesondere bei den Anfangsladezuständen für die energiewirtschaftliche Planung einigermaßen zutreffende Vorhersagen möglich. Wie der **Abbildung 23** ebenfalls entnommen werden kann, treffen die Anfangsbelegungen, das heißt ob sich eine Wechselbatterie in der Station oder an Bord eines Fahrzeugs befindet, gänzlich zu. Dies ist sehr entscheidend dafür, ob die energiewirtschaftlichen Ablaufpläne in geeigneter Weise ausführbar sind und somit die Tags voraus gemachten Flexibilitätsangaben für die Minutenreserve eingehalten werden können.

2.3 Entwicklung von Werkzeugen zur energiewirtschaftlich optimierenden Ablaufplanung

Rund um die Zweitnutzung der Wechselbatterien des Containerterminalbetriebs erwächst eine Planungsproblemstellung, die Besonderheiten gegenüber althergebrachter Kraftwerkseinsatzplanung oder dem Management von Transportsystemen aufweist. Denn die Konditionierung der Batteriespeichersysteme muss als ein integraler Bestandteil der Planung der Elektrizitätsbereitstellung für das sie umgebende geschlossene Transportsystem aufgegriffen werden. Es gibt eine Vielzahl optionaler Einsatzaktivitäten für die Wechselbatterien, welche die Aufenthaltszeiträume der Wechselbatterien bestimmen sowie den Ladezustand bei der Abgabe an die Station und die Aufnahme von der Station ausmachen. Die elektrische Energie tritt in dieser Planungsproblemstellung als eine nicht-erneuerbare Ressource auf, die von Wechselbatterien lokal bevorratet wird. In diesem Sinne können sowohl die Zeitpunkte der Produktion wie auch des Konsums der elektrischen Energie variiert werden. Die betriebliche Flexibilität bei der Elektrizitätsbereitstellung für die Fahrzeuge kann zeitlich wie mengenmäßig in differenzierte Bahnen gelenkt werden. Durch die Entscheidung über die Einsatzzeiträume der Wechselbatterien und die Festlegung von Ladeverläufen kann Zuschalt- und Abschaltpotenzial zu unterschiedlicher Zeit und in verschiedener Höhe ausgebildet werden.

Im BESIC-Projekt wurde ein heuristischer Lösungsansatz entwickelt, der gleichsam auf die am Vortag handelbaren Produkte des Stromgroßhandels als auch die Tagesausschreibungen für Minutenreserve ausgerichtet ist. Er umfasst insgesamt vier Problemlösungsmodule: Diese werden zur Generierung einer Startlösung und der anschließenden lokalen Suche nach einer attraktiven Schlusslösung verwendet. Hervorzuheben ist dabei die Möglichkeit zur Einsatzoptimierung, indem einzelne Stücke von Minutenreserveangeboten gegenüber den möglichen Vergünstigungen im Strombezug abgewogen werden. Es wird rückversichert, dass nicht etwa ein Angebotsstück eine Festlegung von Ladeleistung in einer ungünstigen Zeitscheibe bindet, ohne den Preisnachteil beim Strombezug durch Mehrung der Minutenreserveerlöse zu über treffen.

2.3.1 Integrierte Planung von Fahrzeug und Batterieeinsatz

2.3.1.1 Einsatz von Fahrzeugen und Batterien

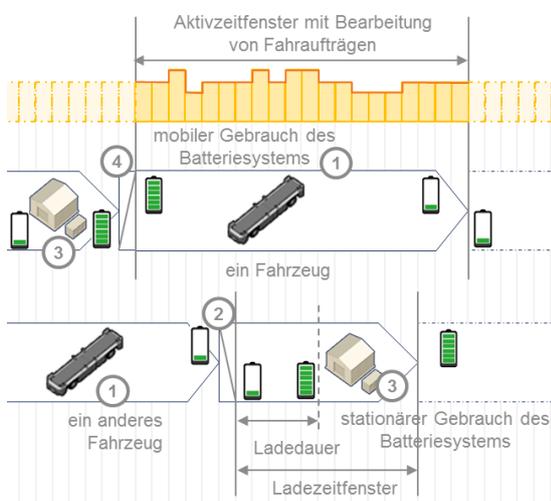


Abbildung 24: Genereller Aufbau eines Einsatzplans für die Batteriesysteme eines Pools

An eine Flotte von Fahrzeugen werden bei Abfertigung eines Containerschiffes fortlaufend Transportaufträge gerichtet. Von Interesse für diesen Problembereich der Zuordnung/Belegung von Fahrzeugen und Batteriesystemen untereinander sind die Transportaufträge, die den batterie-betriebenen Fahrzeugen zugewiesen werden. Um die Problemstellung einfacher handhabbar zu machen, kann die Zuweisung von Transportaufträgen an die Fahrzeuge auch mit einer diskreten Zeitachse betrachtet werden. Der Planungshorizont besteht dann aus einer Menge von Zeitscheiben mit einheitlicher Länge. Wie in **Abbildung 24** angedeutet ist, fallen gemäß der Auftragsfolge in einer solchen Zeitscheibe keine oder auch mehrere Transportaufträge zusammen. Für jede Zeitscheibe ist somit als Eingabe zu diesem Problembereich vorgegeben, wie viel

Transportleistung von jedem Fahrzeug zu erbringen ist. Das Besondere für die Planung ist nun die Anwendung eines Batteriewechselkonzepts, wodurch die batterie-betriebenen Fahrzeuge die meiste Zeit aktiv gehalten werden können. Die Batteriesysteme müssen an zentraler Stelle geladen werden, ehe elektrische Energie durch das Wechseln der Batteriesysteme an die Fahrzeuge verteilt werden kann. In **Abbildung 24** ist nebenbei ersichtlich, dass ein Batteriesystem dabei folgenden Zyklus durchläuft: Es wird in Ausstattung eines Fahrzeugs fungieren ①, von diesem an die Station abgegeben ②, beim Aufenthalt in der Station geladen ③ und dann wieder von einem Fahrzeug aufgenommen ④.

Tabelle 6: Prioritäten- und Zuordnungsregeln für die Grobplanung der Einsatzaktivitäten von Wechselbatterien und Fahrzeugen

	Planungsebene	Kurzbeschreibung
 Prioritätenregeln	Batterieeinsatz (Grobplanung)	Mit Hilfe von Konstruktionsheuristiken wird eine Grobplanung für den Fahrzeug- und Batterieeinsatz mit Berücksichtigung von Batteriewechseln durchgeführt.
	Prioritätenregel Batteriewechselvorgänge Wechselbatterien	Im Rahmen der Einsatzplanung wird der Betrieb von Fahrzeugen, für die eine hohe Transportleistung vorgesehen ist, als vorrangig erachtet. Bezüglich der Aufnahme von Wechselbatterien werden darum Fahrzeuge priorisiert, die in den nächsten Zeiteinheiten ein intensives Transportauftragsprogramm zu absolvieren haben. Damit wird darauf abgezielt, dass diese Transportfahrzeuge so schnell wie möglich aufs Neue ihren Fahrbetrieb wiederaufnehmen können.
	Warteschlangenprinzip Warte- und Abgabevorgang Wechselbatterien	Ist ein Transportfahrzeug mit einer Wechselbatterie ausgestattet, deren Ladezustand in den Reservebereich abgefallen ist, so muss ein Batteriewechsel durchgeführt werden. Für einen Batteriewechsel begibt sich das Transportfahrzeug zu einer Station und wartet dort auf Zugang zu einer Wechselposition in der Batteriewechselstation. Der Zugang zur Wechselposition ist durch ein Warteschlangenprinzip geregelt.
	Zuordnungsregel für die Begebenheit an eine Station (Lowest Workload)	Es werden sämtliche Stationen betrachtet und nach der Auslastung ihrer Ladestellen sortiert. Die Wechselposition einer Station mit dem niedrigsten Auslastungswert wird für eine anstehende Warte- oder Abgabeaktivität ausgewählt. In Ausstattungsszenarios mit bloß einer einzigen Station erübrigt sich diese Auswahlprozedur.
	Zuordnungsregel für die Aufnahme von Wechselbatterien (Highest State Of Charge)	Es werden sämtliche Wechselbatterien betrachtet, die derzeit Ladestellen der betreffenden Station auslasten. Es ist unerheblich, ob die Ladeprozesse noch in Gang sind oder die Wechselbatterie bereits ihren Vollladezustand erreicht hat. Sie werden nach ihrem Ladezustand sortiert und die Wechselbatterie mit dem höchsten Ladezustand wird für eine anstehende Fahrbetriebs- bzw. Aufnahmeaktivität ausgewählt.
Auswahlregeln	Zuordnungsregel für Lade-/Entladeleistung (Rush)	Für eine bestehende mobile Einsatzaktivität wird eine Entladeleistung ausgewählt, die exakt der im Fahrbetrieb geforderten Transportleistung entspricht. Für eine bestehende stationäre Einsatzaktivität wird die größtmögliche Ladeleistung ausgewählt, so dass die Wechselbatterie schnellstmöglich auf den Vollladezustand gebracht wird. Damit wird darauf abgezielt, die Wechselbatterie stets zum höchstmöglichen Ladezustand verfügbar zu machen.

Die Menge von Einsatzaktivitäten der Fahrzeuge und Wechselbatterien ist allerdings nicht starr vorgegeben. Im Zuge der Grobplanung müssen nach und nach Einsatzaktivitäten erstellt und diese zu einem Plan zusammengesetzt werden (vgl. Prioritäten- und Zuordnungsregeln in Tabelle 6). Der Planungshorizont wird von der ersten bis zur letzten Zeitscheibe durchlaufen und dabei wiederholt die nachfolgenden Schritte ausgeführt:

- Sukzessive Berechnung von Zustandsinformationen im Zeitverlauf**

Für den Auftakt in den Planungshorizont werden die Anfangsladezustände in die Planungsproblemstellung übernommen. Davon ausgehend werden im Zeitverlauf die Ladezustände der Wechselbatterien über die in Teilaktivitäten festgelegten Lade-/Entladeleistungen berechnet. Die Batterieladezustände sind ausschlaggebend für die Beendigung von Fahrzeugeinsatzaktivitäten. Zudem werden die Auslastungswerte der Wechselpositionen und auch der Ladestellen in den Stationen nachvollzogen. Für eine

etwaige Neuordnung muss geschaut werden, wie es in der aktuellen Zeitscheibe um die kumulative Ressourcennutzung bestellt ist.

- Erstellung neuer Einsatzaktivitäten und Festlegung des Ressourcenbedarfs

Mit Blick auf die Ressourcenzuordnungen aus der vorangegangenen Zeitscheibe oder der anfänglichen Ressourcenzuordnung wird bestimmt, welche Einsatzaktivitäten zu Ende geführt sind. Gemäß einem festen Einsatzzyklus werden dann für die aktuelle Zeitscheibe die Einsatzaktivitäten der jeweils nachfolgenden Einsatzweisen neu erstellt. Auf den stationären Gebrauch einer Wechselbatterie folgt zum Beispiel die Aufnahme dieser Wechselbatterie durch ein Fahrzeug. Der Auslöser dafür ist, dass sich ein Transportfahrzeug an die Station begeben hat, um die verfügbare Wechselbatterie aufzunehmen.

- Behandlung der Batteriewechselvorgänge als Auslöser neuer Einsatzaktivitäten

Ähnlich wie sich die Lade-/Entladeprozesse durch Teilaktivitäten über die Zeit entwickeln, gehen auch die Batteriewechselvorgänge vonstatten. Über den aktuellen Auslastungszustand für die Wechselpositionen einer Station hinaus wird eine Warteschlange von Fahrzeugen geführt, die sich an die Station begeben. Gelangt ein Fahrzeug in der aktuellen Zeitscheibe an die vorderste Position in der Warteschlange, wird der Zugang auf die betreffende Wechselposition gewährt und in einer Teilaktivität die Abgabe der Wechselbatterie durchgeführt. Daraufhin wird geprüft, ob das Fahrzeug in anderweitiger Teilaktivität auch noch die Aufnahme einer frisch geladenen Wechselbatterie vollziehen kann. Nachfolgend zur Aufnahme einer Wechselbatterie wird diese eben in demjenigen Fahrzeug mobil gebraucht, welches sie von der betreffenden Station aufgenommen hat. Zugleich geht es nach Aufnahme einer Wechselbatterie für das betreffende Transportfahrzeug aufs Neue mit dem Fahrbetrieb weiter. Je nachdem wie lang die aktuelle Zeitscheibe ist, kann mehr als ein Fahrzeug die Teilaktivitäten zur Abgabe/Aufnahme von Wechselbatterien durchmachen. Alle sonstigen Fahrzeuge, die in der Warteschlange verbleiben, bekommen eine Teilaktivität für das Warten vermerkt.

- Behandlung des Fahrbetriebs als Auslöser neuer Aktivitäten

Im Fahrbetrieb haben die Transportfahrzeuge strikt die Transportleistung zu erfüllen, die für sie individuell in der aktuellen Zeitscheibe vorgesehen ist. Der mobile Gebrauch einer Wechselbatterie, der mit dem Fahrbetrieb korrespondiert, erhält die Entladeleistung passend zu dieser Transportleistung für die aktuelle Zeitscheibe zugeschrieben. Der mobile Gebrauch einer Wechselbatterie bzw. der Fahrbetrieb eines Transportfahrzeugs endet damit, dass der Ladezustand der Wechselbatterie in den Reservebereich abgefallen ist. Dann wird für Batteriewechselvorgänge mit dem Fahrbetrieb des Transportfahrzeugs abgeschlossen.

- Priorisierung der neuen Einsatzaktivitäten und Auswahl von Ressourcen

Vielfach müssen für neu erstellte Einsatzaktivitäten die Ressourcenzuordnungen der vorangegangenen Einsatzaktivität übernommen werden. Durch die Auswahl einer Wechselbatterie beim Aufnahmevorgang wird folglich mit darüber entschieden, mit welcher Wechselbatterie dieses Transportfahrzeug während des Fahrbetriebs ausgestattet ist. Einige Einsatzaktivitäten können allerdings nicht neu erstellt werden, ohne offene Ressourcenbedarfe zu schaffen. Zum Beispiel kann hinsichtlich der Aufnahme einer Wechselbatterie zwar die Zuordnung der Wechselposition von der Abgabe der Wechselbatterie an die Station übernommen werden. Es muss jedoch noch eine Wechselbatterie ausgewählt werden, welche an Bord des Fahrzeugs aufgenommen wird. Als weiteres Beispiel trifft es auf das Warten auf Zugang zur Station oder die Abgabe einer Wechselbatterie an die Station zu, die korrespondierend zu den vorausgegangenen Batterieeinsatzaktivitäten von einer Fahrzeugeinsatzaktivität ausgelöst worden sind. Solche anstehenden Einsatzaktivitäten werden danach sortiert, wie intensiv das vorhergesehene Transportauftragsprogramm des beteiligten Transportfahrzeugs ist. Es kann bei dieser Sortierung beispiels-

weise die erforderliche Transportleistung der nächsten fünf Zeiteinheiten betrachtet werden. Bei der Auswahl benötigter Ressourcen wird ebenfalls eine Sortierreihenfolge angewandt. Muss ein Transportfahrzeug einen Batteriewechsel vornehmen, wird eine Wechselposition der Batteriewechselstation ausgewählt, welche zurzeit am wenigsten ausgelastet ist.

- Fortführung der übrigen Einsatzaktivitäten

Sind sämtliche benötigte Ressourcen für eine Einsatzaktivität zugeordnet, so können darin für die aktuell betrachtete Zeitscheibe Teilaktivitäten wie beispielsweise für Lade-/Entladeprozesse festgelegt werden. Beim stationären Gebrauch einer Wechselbatterie wird stets die maximal zulässige Ladeleistung gewählt, so dass diese bei ihrem Stationsaufenthalt sofortig und schnellstmöglich geladen wird. Während des stationären Gebrauchs der Wechselbatterie, wird eine Ladestelle in einer Station ausgelastet. Entsprechend der gewählten Ladeleistung wirkt sich der Ladevorgang in der aktuellen Zeitscheibe auf die Leistungsaufnahme in der betreffenden Station aus.

2.3.1.2 Ladeverlauf bei Stationsaufenthalt

Wie in **Abbildung 25** gezeigt, kann die Ladeleistung im Grunde von einer Zeitscheibe zur nächsten im Ladezeitfenster beliebig erhöht oder vermindert werden. Je nachdem um welchen von zwei Batteriesystemtypen es sich handelt, ist die Ladeleistung unterschiedlich begrenzt. Lithium-Batteriesysteme lassen sich deutlich schneller laden als Blei-Batteriesysteme. Bei Blei-Batteriesystemen liegt beispielsweise die maximal zulässige Ladeleistung im Bereich etwa sechstündiger Ladevorgänge. In dieser Problemstellung wird vereinfachend angenommen, dass die zu den Batteriesystemen gehörenden Ladegeräte nicht rückspeisefähig sind. Darum entspricht die

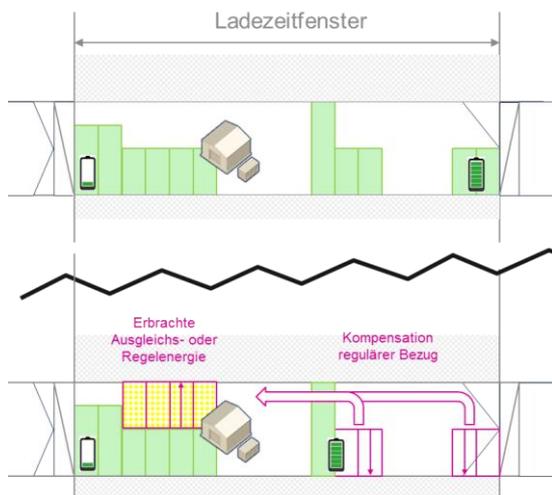


Abbildung 25: Ladeleistung wird zunächst fest eingeplant (oben), um bei Bedarf Regelleistung zu erbringen (unten)

Nullladerate der minimal zulässigen Ladeleistung. Aufgrund dieser Begrenzungen der Ladeleistung ergeben sich die Möglichkeiten für das Zu- und Abschalten in direkter Folge zu einem beliebig gewählten Ladeverlauf. Auf eine einzelne Ladezeitscheibe bezogen kann die Ladeleistung von der geplanten Ladeleistung bis zu einer maximal zulässigen Ladeleistung erhöht werden. Ebenfalls kann die Ladeleistung ganz zurückgefahren werden, also von der geplanten Ladeleistung auf null abgesenkt werden.

In diesem Problembereich geht es darum, in den sich teilweise oder ganz überlappenden Ladezeitfenstern die Intensität des Ladens in der Weise beliebig festzulegen, dass sich ausgehend vom dann fest eingeplanten Verlauf die Möglichkeiten zum Zu- oder Abschalten eines oder mehrerer

Stationsaufenthalte/Ladestellen ergänzen und bestmöglich verwerten lassen. Bei der Planung des Ladeverlaufs müssen jedenfalls die Preise für den Wirkleistungsbezug und gegebenenfalls Erfahrungen mit Leistungspreisangeboten auf dem Regelleistungsmarkt berücksichtigt werden (vgl. Marktorientierung in Tabelle 7). Je nachdem welche liefervertraglichen Rahmenbedingungen angenommen werden können, wird für den Strombezug innerhalb einer Zeitscheibe mit einem Fixpreis oder einem variablen, vom Lieferanten signalisierten Preis kalkuliert. Die Summe der Strombezugskosten über alle seinen Zeitscheiben zugeordneten Ladeleistungen ergibt die Strombezugskosten für einen Stationsaufenthalt insgesamt.

Tabelle 7: Neuordnungsregel für die Feinplanung der Ladeverläufe bei den Stationsaufenthalten der Wechselbatterien

	<p>Ladeverläufe (Feinplanung)</p>	<p>Weitere Konstruktionsheuristiken lassen unter spezifischen Optimierungsgesichtspunkten die Ladeverläufe für die Wechselbatterien während ihres Aufenthalts in der Station planen. Dabei wird die im Rahmen der Grobplanung zugeordnete Ladeleistung komplett eingesammelt und innerhalb der bestehenden Stationsaufenthaltszeiträume eine Neuordnung der Ladeleistung an die entsprechenden Teilaktivitäten vorgenommen.</p>
<p>A</p>	<p>Orientierung auf Regelleistungsmarkt</p>	<p>Insoweit die Zeiträume der Stationsaufenthalte der Wechselbatterien feststehen, gibt es ein Maximum an Zu- und Abschaltpotenzial, das für eine bestimmte Produktperiode für Minutenreserve eingerichtet werden kann. Für jede stationäre Batterieeinsatzaktivität wird versucht die Ladeleistung neu zuzuordnen/umzuverteilen. Es werden alle Produktperioden für Minutenreserve herausgesucht, die sich zeitlich mit dem Stationsaufenthalt der Wechselbatterie überlappen. Diese Produktperioden werden dann in der Reihenfolge der für sie prognostizierten Leistungspreise durchlaufen. Es kann höchstens so viel nützlichen Abschaltpotenzial erreicht werden, wie Ladeleistung in den Erbringungsteil – also in die Produktperiode an sich – zugeordnet/verteilt werden kann. Hinreichend ist dies allerdings erst, wenn innerhalb des Stationsaufenthalts im Anschluss nach der Produktperiode auch noch so viel oder mehr Zuschaltpotenzial zur Kompensation erreicht wird. Andersherum kann höchstens so viel nützlich Zuschaltpotenzial erreicht werden wie Ladeleistung innerhalb des Stationsaufenthalts im Anschluss nach der Produktperiode zugeordnet/verteilt werden kann. Es werden damit vorrangig im Zusammenhang mehrerer ausgelasteter Ladestellen bzw. Stationsaufenthalte Angebotschnippel für eine höher bewertete Produktperiode entschieden als vereinzelt mit nur einer Ladestelle einen kompletten vierstündigen Angebotsblock zu beschließen.</p>
<p>1</p>	<p>Maximum an Leistungspreiserlösen durch Minutenreserve</p>	<p>Wenn Ladeleistung innerhalb eines Stationsaufenthalts im Anschluss nach einer Produktperiode zugeordnet/verteilt werden muss, um – praktisch im Gegenzug zur Vorhaltung negativer Regelleistung – Möglichkeiten zur Kompensation einer eventuellen Zuschaltung zu schaffen, so wird darauf geachtet, dass dadurch nicht eine nächstbeste Produktperiode möglichen Zuschaltpotenzials beraubt wird. Dazu werden alle Produktperioden für ein Angebot positiver Regelleistung herausgefiltert, die sich mit dem Stationsaufenthalt zeitlich überlappen und doch hinter der aktuell betrachteten, höher bewerteten Produktperiode liegen. In diese Produktperioden wird dann primär in der Reihenfolge ihrer prognostizierten Leistungspreise die fragliche Ladeleistung zugeordnet/platziert. Sollte dann noch weitere Ladeleistung zu platzieren sein, werden nach soeben beschriebenen zeitlichen Kriterien die Produktperioden für ein Angebot negativer Regelleistung herausgefiltert. In diese wird sekundär in umgekehrter Reihenfolge ihrer Leistungspreise die verbleibende Ladeleistung zugeordnet/platziert. So ist gewährleistet, dass die Zuordnung/Verteilung der Ladeleistung den Leistungspreiserlösen aus dem Angebot positiver Regelleistung am meisten zu Gute kommt oder aber den Leistungspreiserlösen aus dem Angebot negativer Regelleistung weniger abträglich ist.</p> <p>Es ist dann unmöglich, die angebotene Regelleistung zu steigern, ohne dass Ladeleistung umverteilt werden muss, die durch einen Angebotschnippel oder ein Stück eines Komplettangebots für eine höherwertigere Produktperiode gebunden ist. Es wird demnach für eine Ladestellenbelegung bzw. die Stationsaufenthalte von Wechselbatterien nur dann Ladeleistung ungebunden/frei zuordenbar verbleiben, wenn sich daraus nicht mal im Zusammenhang mit anderen Ladestellenbelegungen und deren möglichen Angebotschnippeln ein Komplettangebot erstellen lässt.</p>
<p>2</p>	<p>Hohe Leistungspreiserlöse für Minutenreserve im Kompromiss mit Strombezugskosten</p>	<p>Alternativ wird bei Zuordnung/Verteilung von Ladeleistung innerhalb eines Stationsaufenthalts im Anschluss nach einer Produktperiode – wie bereits oben beschrieben – darauf geachtet, dass eine eventuelle Zuschaltung kompensiert werden kann und zu möglichst niedrigen Bezugspreiskonditionen geladen wird. Es werden sämtliche Zeitscheiben des Stationsaufenthaltszeitraums herausgefiltert, die hinter der aktuell betrachteten Produktperiode liegen. In der Reihenfolge der für sie prognostizierten/mitgeteilten Strombezugspreis wird ihnen die fragliche Ladeleistung nach und nach zugeordnet/bei ihnen platziert.</p>
<p>B</p>	<p>Orientierung auf Wirkleistungsmarkt</p>	<p>Insoweit die Zeiträume der Stationsaufenthalte der Wechselbatterien feststehen, gibt es ein Minimum an Kosten für den Strombezug. Für jede stationäre Batterieeinsatzaktivität wird versucht die Ladeleistung neu zuzuordnen/umzuverteilen.</p>
<p>1</p>	<p>Minimum an Strombezugskosten</p>	<p>Es werden alle Zeitscheiben der stationären Batterieeinsatzaktivität in eine Liste gebracht und nach dem für sie prognostizierten/mitgeteilten Strombezugspreis sortiert. In aufsteigender Reihenfolge wird diesen Zeitscheiben nach und nach die fragliche Ladeleistung zugeordnet/an diese verteilt.</p>

2.3.2 Veräußerung von Lastverschiebungspotenzialen

Durch die Wahl des Ladeverlaufs wird das Lastverschiebepotenzial ausgeprägt, welches es in diesem Problemereich zu bewerten gilt. Die Strombezugskosten insgesamt müssen mit etwaigen Erlösen, zum Beispiel aus dem Angebot von Regelleistung und weiteren Kosten-/Erlösarten wie beispielsweise Arbeitspreisvergütungen bei der Erbringung von Regelleistung und Pönalen für kurzfristige Fahrplananpassung verrechnet werden. Für jeden Zeitpunkt innerhalb des Ladezeitfensters eines Batteriesystems kann ausgesagt werden, wie viel bis zu diesem Zeitpunkt zugeschaltet werden kann und ab diesem Zeitpunkt abgeschaltet werden kann – sowie umgekehrt, wie viel bis zu diesem Zeitpunkt abgeschaltet werden kann und ab diesem Zeitpunkt zugeschaltet werden kann. Es wird davon ausgegangen, dass eine Anpassung der Ladeleistung nur zukunftsgerichtet angelegt sein kann, um zu verhindern, dass der gewünschte Ladezustand zum Ende des Ladezeitfensters verpasst wird. In **Abbildung 25** ist beispielhaft eine Erbringung von negativer Regelleistung per Abruf über einen Zeitraum von vier Stunden (Erhöhung um die Hälfte der maximalen Ladeleistung) und eine mögliche Kompensation (Adjustierung des geplanten Ladeverlaufs) dargestellt.

	<p>Angebote Minutenreserve (Feinplanung)</p>	<p>Durch die zugeordnete/festgelegte Ladeleistung wird ein Zuschalt- und Abschaltpotenzial ausgeprägt, welches zum Angebot von Minutenreserve gebraucht werden kann. Dabei kann es vorkommen, dass das Zuschalt-/Abschaltpotenzial in einer Zeitscheibe nicht komplett losgelöst von der einer anderen Zeitscheibe dazu verwendet werden kann, ein konkretes Minutenreserveangebot zu erstellen.</p>
<p>1</p>		<p>Die Produktperioden für Minutenreserve werden in absteigender Reihenfolge ihrer Leistungspreise durchlaufen. Aus allen stationären Einsatzaktivitäten, die sich zeitlich mit der Produktperiode überlappen, werden Elementarbausteine von Minutenreserveangeboten herausgesammelt. Diese bestehen aus dem Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial einer Zeitscheibe innerhalb der Produktperiode (Erbringungsteil) und einem gegensätzlichen Abschalt- bzw. Zuschaltpotenzial einer Zeitscheibe aus dem Stationsaufenthalt der Wechselbatterie nach der Produktperiode (Kompensationsteil). Aus einem Vorrat wird wiederholt gezogen und die Elementarbausteine sinnvoll zu Angebotsstücken (scheibchenweise) zusammengesetzt. Da das Laden an den mit Blei-Batteriesystemen ausgelasteten Ladestellen nur gänzlich an- und abgeschaltet werden kann, werden Minutenreserveangebote in einer Stückelung der maximalen Ladeleistung eines Blei-Batteriesystems geplant. Ein Angebotsstück besteht aus mehreren Elementarbausteinen, deren Erbringungsteile zeitlich direkt aufeinanderfolgen und die ganze aktuell betrachtete Produktperiode abdecken. Nachdem ein Elementarbaustein für ein Angebotsstück gezogen/verwandt wurde, müssen Elementarbausteine aus dem Vorrat entfernt werden, welche entweder auf demselben Erbringungs- oder Kompensationsteil basieren. Schließlich wird die Nutzung der Zuschalt- bzw. Abschaltpotenziale aus den verwendeten Elementarbausteinen im Plan vermerkt. Die überhängenden Elementarbausteine, die kein komplettes Angebotsstück mehr ergeben, werden abgeschnitten.</p>

Details bei der kombiniert optimierenden Planung der Ladeverläufe und der Nutzung von Lastverschiebepotenzial

Vergünstigungen im Strombezug können mit Erlösen aus der Bereitstellung von Minutenreserve kombiniert werden. Die Idee dahinter ist, in einem ersten Ablaufplan alle Minutenreserveangebote sichtbar zu machen, die zu einem Maximum an Leistungspreiserlösen führen. Dann kann jedes Angebotsstück hinterfragt werden, ob es Ladeleistung in Zeitscheiben bindet, die nach Maßgabe der Bezugspräferenzen ungünstig sind. Falls zutreffend, wird Ladeleistung unter möglichen Abhängigkeiten zu anderen Angebotsstücken in die günstigsten Zeitabschnitte umverteilt. In einzelne Zeitscheiben kann nur so viel Ladeleistung platziert werden, wie es die Leistungskapazität der Wechselbatterien und der Grenzwert für den Viertelstundenverbrauch zulassen.

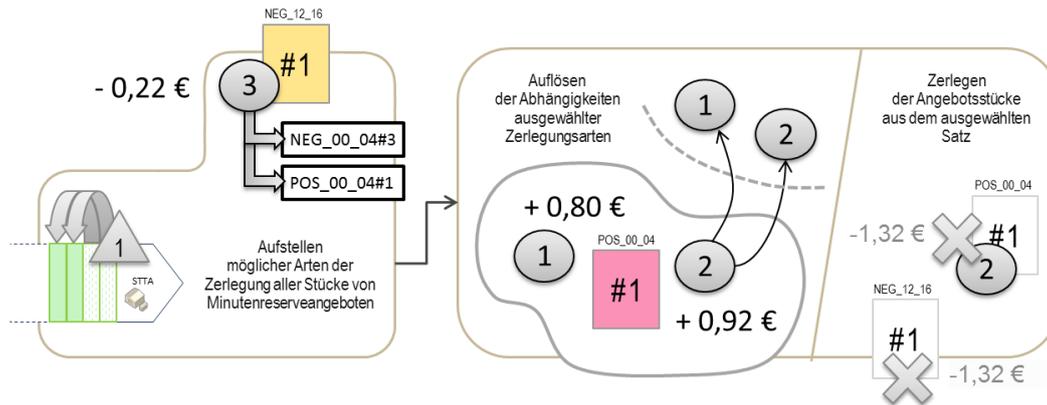


Abbildung 26: Übersicht der Dekonstruktionsschritte bei Abwägung von Minutenreserveerlösen gegenüber den Kosten des Strombezugs

Zur Abwägung der Erlöse aus dem Angebot von Minutenreserveleistung gegenüber den Kosten für den Strombezug werden die in **Abbildung 26** gezeigten Dekonstruktionsschritte durchlaufen:

- Aufstellen möglicher Arten der Zerlegung aller Stücke von Minutenreserveangeboten**

Für jedes Stück eines Minutenreserveangebots wird geschaut, auf welche verschiedenen Arten es an sich aufgehoben und die freigesetzte Ladeleistung umverteilt werden kann. Dabei ist der Spielraum für die Umverteilung der Ladeleistung nicht isoliert bei einem bestimmten Angebotsstück zu sehen. Bei einigen Arten der Zerlegung ist gedanklich vorauszusetzen, dass neben ihm auch noch anderweitige Angebotsstücke in irgendeiner Art zerlegt werden. Dies trifft zu, wenn ausgehend von einem Stationsaufenthalt einer Wechselbatterie mehrere Stücke von Minutenreserveangeboten zu Stande gekommen sind.
- Auflösen der Abhängigkeiten ausgewählter Zerlegungsarten**

In diesem Universum verschiedener Arten der Zerlegung ist ein Satz von ihnen herauszusuchen, in welchem die Zerlegungsarten einander die Voraussetzungen gegenüber dem vorliegenden Planungsstand erfüllen und für einen nächsten Planungsstand eine Verbesserung des Gesamtergebnisses versprechen. Doch es gibt ebenso viele Weisen, die Voraussetzungen für eine bestimmte Art der Zerlegung eines Angebotsstücks zu erfüllen, wie die jeweiligen Arten der Zerlegung der anderweitigen Angebotsstücke miteinander kombiniert werden können. Es müssen sämtliche Alternativen dafür abgeprüft werden, die Voraussetzungen einer bestimmten Zerlegungsart direkt über eine andere Zerlegungsart oder indirekt über eine Kette von anderen Zerlegungsarten zu erfüllen.
- Zerlegen der Angebotsstücke aus dem ausgewählten Satz**

Die ausgewählten Arten der Zerlegung können in beliebiger Reihenfolge am vorliegenden Planungsstand vorgenommen und damit ein nächster Planungsstand fabriziert werden.

2.3.2.1 Dependenzgraph für die Zerlegung von Angebotsstücken

In **Abbildung 27** wird verdeutlicht, dass sich auf der Grundlage der Varianten für die Umlage der Festlegungen von Ladeleistung bei den einzelnen Schnipselgruppen eine Vielzahl von Kombinationen für die Umverteilung von Ladeleistung bei der Zerlegung eines Angebotsstücks ergeben kann. Es wird eine etwaige Zerlegung des ersten Stücks eines Angebots negativer Regelleistung von der Stunde 13 bis Stunde 16 (NEG_12_16#1) ^{#1} geprüft. Eine erste Schnipselgruppe dieses Angebotsstücks geht auf den Stationsaufenthalt der Wechselbatterie 'BAT7' zurück. Für diese Schnipselgruppe ¹2 sind insgesamt zwei Varianten ¹ entdeckt worden. Eine erste Variante ¹ sieht vor, dass sich die Strombezugskosten durch Umlage der Festlegungen von Ladeleistung innerhalb des Stationsaufenthaltszeitraums um $0,12 \text{ EUR}$ reduzieren ließen. Mit der zweiten Variante ², welche neben der Zerlegung von NEG_12_16#1 eine Zerlegung von NEG_08_12#2 voraussetzt, ließen sich die Strombezugskosten

sogar um 0,48 EUR drücken. In diesem Beispiel kommt also die Zerschlagung der ersten Schnipselgruppe im Stationsaufenthalt mit einer Schnipselgruppe eines anderweitigen Angebotsstücks ins Gehege. Eine zweite Schnipselgruppe geht auf den Stationsaufenthalt der Wechselbatterie 'BAT8' zurück. Für diese Schnipselgruppe \triangle_{12} existieren insgesamt drei \triangle Varianten. Die Basisvariante \triangle_1 bringt eine Vergünstigung um 0,20 EUR mit sich. Mit der \triangle_2 zweiten Variante, welche neben der Zerlegung von NEG_12_16#1 eine Zerlegung von NEG_00_04#3 voraussetzt, würden die Strombezugskosten um 0,36 EUR reduziert. Eine dritte Variante \triangle_3 setzt neben der Zerlegung von NEG_12_16#1 eine Zerlegung von NEG_00_04#3 und einem weiteren Angebotsstück POS_00_04#1 voraus, womit sich die Strombezugskosten um 0,42 EUR reduzieren ließen.

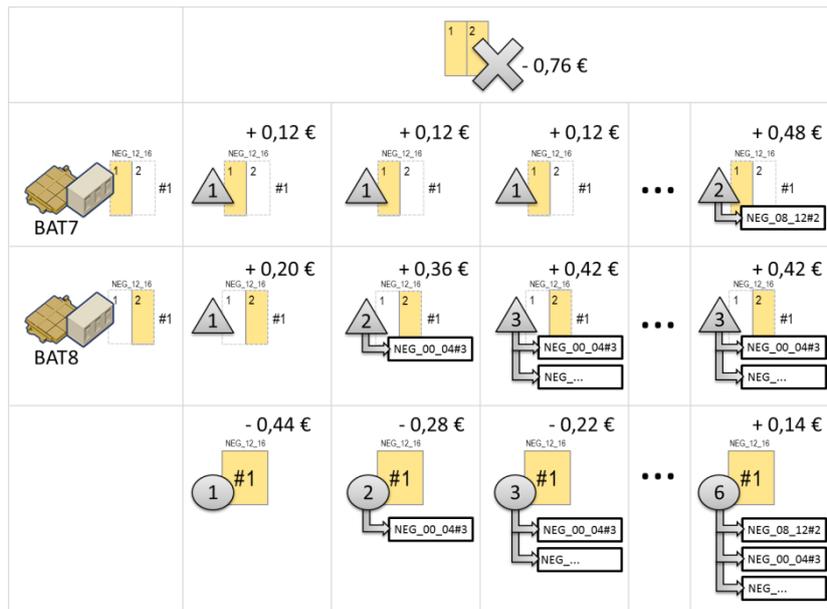


Abbildung 27: Kombination einzelner Varianten der Schnipselgruppen für die Angebotsstücke

Wie auch immer die Varianten einer Zerschlagung der unterschiedlichen Schnipselgruppen miteinander kombiniert werden; eine Zerlegung von NEG_12_16#1 würde jedenfalls zu einer Erlösminderung von 0,76 EUR führen. Eine erste Kombination \triangle_1 bestünde darin, dass die erste Schnipselgruppe in ihrer ersten Variante \triangle_1 \triangle_{12} und die zweite Schnipselgruppe in ihrer ersten Variante \triangle_1 \triangle_{12} zerschlagen würden. Dies entspräche einer Vergünstigung von insgesamt 0,32 EUR und einer Erlösminderung von 0,76 EUR. Unterm Strich würde also nach dieser Art der Zerlegung von NEG_12_16#1 ein nächster Planungsstand um 0,44 EUR leichter ausfallen. Eine zweite Kombination \triangle_2 begründet sich darauf, dass die erste Schnipselgruppe in ihrer ersten Variante \triangle_1 \triangle_{12} und die zweite Schnipselgruppe in ihrer zweiten Variante \triangle_2 \triangle_{12} zerschlagen würden. Dies liefe auf eine Vergünstigung von insgesamt 0,48 EUR und einer Erlösminderung von 0,76 EUR hinaus. Damit würde zwar ein nächster Planungsstand aus der Betrachtung der Zerlegung von NEG_12_16#1 für sich etwas weniger belastet; für eine Zerlegung von NEG_12_16#1 in dieser Art ist jedoch eine Voraussetzung, dass NEG_00_04#3 in irgendeiner Weise mit zerlegt würde. Ähnlich zeigt sich dies in der \triangle_3 dritten Kombination, die sich ebenfalls auf der ersten Variante für die erste Schnipselgruppe \triangle_1 \triangle_{12} begründet. Die Voraussetzungen einer Zerlegung von NEG_00_04#3 und NEG_... von der dritten Variante für die zweite Schnipselgruppe \triangle_3 \triangle_{12} strahlen auf diese Art der Zerlegung von NEG_12_16#1 durch. Bei der Kombination \triangle_6 ist zu sehen, dass von der zweiten Variante für die erste Schnipselgruppe \triangle_2 \triangle_{12} die Voraussetzung einer Zerlegung von NEG_08_12#2 und von der dritten Variante für die zweite Schnipselgruppe \triangle_3 \triangle_{12} die Voraussetzungen einer Zerlegung von NEG_00_04#3 sowie POS_00_04#1 zusammen genommen werden.

Entsprechend ihrer Voraussetzungen der Zerlegung anderweitiger Angebotsstücke können die verschiedenen Arten der Zerlegung von Angebotsstücken in die Struktur eines gerichteten Hypergraphs gebracht werden. Die Knoten im Dependenzgraph sind einzelne Arten der Zerlegung von Angebotsstücken. Sie lassen sich zu Clustern der von einer Zerlegungsart als hauptsächlich betrachteten Angebotsstücke anordnen. Jeder von ihnen ist damit gekennzeichnet, welche Veränderung des Gesamtergebnisses bei seiner Art der Zerlegung eines Angebotsstücks an sich eintreten würde. Der Dependenzgraph spiegelt mit seinen Vorwärtshyperkanten wider, wie die Voraussetzungen zwischen einzelnen Arten der Zerlegung von Angebotsstücken direkt erfüllt werden können. Ein oder mehrere Zielknoten stehen für bestimmte Arten der Zerlegung sämtlicher anderweitigen Angebotsstücke, deren Zerlegung von der Art der Zerlegung eines Angebotsstücks im Quellknoten vorausgesetzt wird.

Für NEG_12_16#1 existieren in diesem Beispiel sechs verschiedene Arten der Zerlegung. Eine erste Zerlegungsart ① bestünde darin, sämtliche Schnipselgruppen in ihren Basisvarianten zu zerschlagen, so dass keinerlei anderweitige Angebotsstückzerlegungen vorauszusetzen sind. Eine zweite Zerlegungsart ② für NEG_12_16#1 sieht vor, eine der Schnipselgruppen in einer Variante zu zerschlagen, bei welcher die Zerlegung NEG_00_04#3 vorauszusetzen ist. Dies wird mit den zwei Hyperkanten von dem Knoten der Kombination für NEG_12_16#1 als Quellknoten zu jeweils einem der Knoten der Kombinationen für NEG_00_04#3 als Zielknoten repräsentiert. Sollte NEG_12_16#1 gemäß der zweiten Kombination zerlegt werden, müsste auch das Angebotsstück NEG_00_04#3 in irgendeiner von insgesamt zwei Arten zerlegt werden.

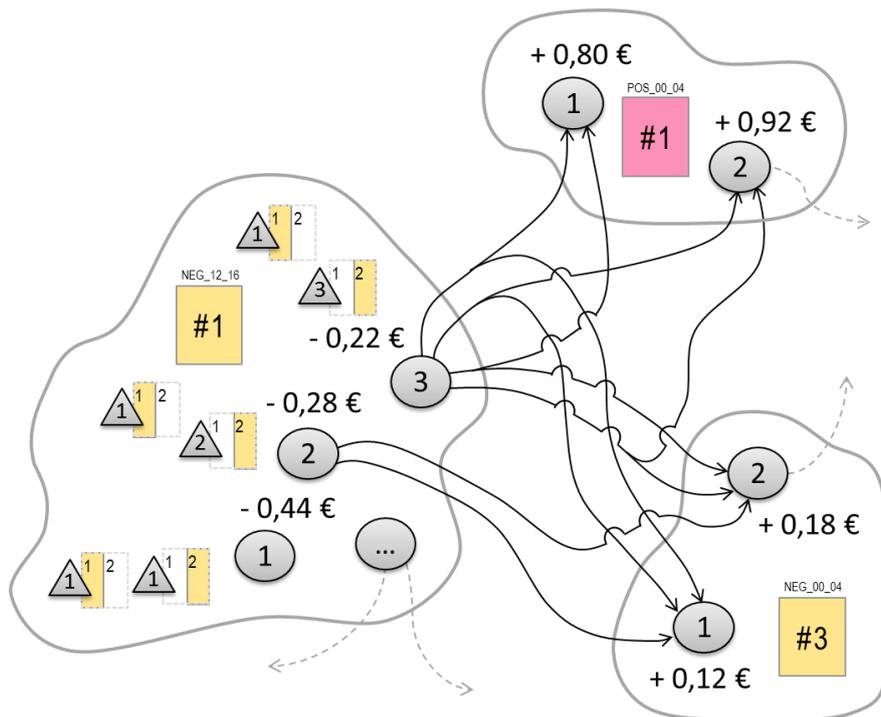


Abbildung 28: Aufbau eines Dependenzgraphs bezüglich der Zerlegung mehrerer Stücke von Minutenreserveangeboten

Bei der dritten Art der Zerlegung ③ bei NEG_12_16#1 ist vorgesehen, dass eine oder durchaus mehrere Schnipselgruppen in solchen Varianten zerschlagen werden, bei welcher neben der Zerlegung von NEG_00_04#3 auch noch die Zerlegung von POS_00_04#1 vorauszusetzen ist. Im Dependenzgraph wird dies durch sechs gerichtete Hyperkanten repräsentiert, die den Knoten der dritten Kombination von NEG_12_16#1 als Quellknoten zu allen Paaren mit je einem Knoten einer Kombination von POS_00_04#1 und einem Knoten einer Kombination von NEG_00_04#3 als Zielknoten verbindet.

2.3.2.2 Lösen des Suchproblems für Teilgraphen im Dependenzgraph zur Angebotszerlegung

Um einen nächsten Stand des Ablaufplans zu bekommen, werden ein oder mehrere Teilgraphen aus dem Dependenzgraph gesucht, in welchem für jeden Knoten genau eine von dessen abgehenden Hyperkanten samt Zielknoten zugehört. Zudem darf einem Teilgraph nicht mehr als Knoten aus einem Cluster des Dependenzgraphs angehören. Ein solcher Teilgraph zeigt nämlich an, welche Angebotsstücke in welcher Art miteinander zerlegt werden sollen, so dass sämtliche Voraussetzungen erfüllt/resolviert sind. Zur Verbesserung des Gesamtergebnisses müssten derartige Teilgraphen im Dependenzgraph gefunden werden, bei denen jeweils die Summe der Kosten aller ihrer Knoten positiv ausfällt. Eine optimale Lösung dieses Suchproblems besteht aus einer Menge von Teilgraphen, die bezüglich der Cluster im Dependenzgraph überlappungsfrei sind und die größtmöglichen Gesamtkosten aufweisen.

In **Abbildung 29** wird einer beispielhafter Dependenzgraph gezeigt, in welchem eine Menge von Teilgraphen mit größtmöglichen positiven Gesamtkosten gefunden werden soll.

In dem dargestellten Beispiel wird der Suchlauf mit \boxed{A} dem Cluster A gestartet.

Als erstes wird a_1 der Suchknoten (a_1) betrachtet. Dieser weist keine unerfüllten Abhängigkeiten auf. Dennoch stellt er keinen Lösungsbeitrag des Suchproblems dar, weil er mit -2 Pkt. negative Gesamtkosten aufweist. Danach ist zum Beispiel ab a_1 dem Knoten a_1 komplett in der Tiefe gesucht worden. Als zweites wird der Suchknoten ($a_2 \dots$) betrachtet. Bei diesem ist eine Abhängigkeit zu den Knoten von Cluster B noch nicht resolviert. Als erstes wird $a_2 \rightarrow b_1$ die Kante von a_2 zu b_1 begangen und einschließlich des Knotens b_1 in den Teilgraph aufgenommen. Im Teilgraph $a_2 \rightarrow b_1$ sind keine Abhängigkeiten mehr unerfüllt; er stellt mit -1 Pkt. ebenfalls einen Lösungsbeitrag mit negativen Gesamtkosten dar. Einige Ausschnitte dieses Teilgraphs können allerdings wegweisend gewesen sein. Insofern in einem Teilgraph aus \boxed{A} dem Cluster A ein Knoten enthalten ist, stellt $\boxed{A} \rightarrow b_1$ mit ± 0 Pkt. die bislang beste bekannte Fortsetzung dar. Vom Suchknoten a_2 wird als zweites die Kante a_2 zu b_2 $a_2 \rightarrow b_2$ begangen und einschließlich des Knotens b_2 in den Teilgraph eingefügt. Es ist ein unvollständiger Lösungsbeitrag entstanden, da der Knoten b_2 eine Abhängigkeit zum Cluster C mit sich bringt, welcher mit $a_2 \rightarrow b_2$ dem Teilgraph ($a_2 \rightarrow b_2 \dots$) noch nicht entsprochen wird. Es wird mit der Suche eine Ebene tiefer beim Suchknoten $a_2 \rightarrow b_2$ sogleich fortgefahren. Als erstes wird $b_2 \rightarrow c_1$ die Kante von b_2 zu c_1 abgegangen und damit $a_2 \rightarrow b_2 \rightarrow c_1$ der Teilgraph ($a_2 \rightarrow b_2 \rightarrow c_1$) aufgedeckt. Dieser ist mit den negativen Gesamtkosten -2 Pkt. ebenfalls kein Lösungsbeitrag des Suchproblems. Insofern die Cluster A und B in einem Teilgraph abgedeckt sind, ist aber $\boxed{A}, \boxed{B} \rightarrow c_1$ mit -4 Pkt. die bis dahin beste bekannte Fortsetzung. Als zweites wird ausgehend vom Suchknoten ($a_2 \rightarrow b_2 \dots$) die Kante b_2 zu c_2 $b_2 \rightarrow c_2$ abgegangen. Der Knoten c_2 bringt seinerseits eine Abhängigkeit für den Cluster A mit sich; der Knoten a_2 ist ja aber bereits im Teilgraph enthalten. Somit stellt $a_2 \rightarrow b_2 \rightarrow c_2$ der Teilgraph ($a_2 \rightarrow b_2 \rightarrow c_2$) einen Lösungsbeitrag mit $+3$ Pkt. dar. Der Teilgraph ($\boxed{A} \rightarrow b_2 \rightarrow c_2$) ist mit $+4$ Pkt. außerdem eine bessere Fortsetzung als ($\boxed{A} \rightarrow b_1$) mit ± 0 Pkt., insofern der Cluster A bereits abgedeckt ist. Es wird auch festgehalten, dass ($\boxed{A}, \boxed{B} \rightarrow c_2$) mit $+1$ Pkt. eine bessere Fortsetzung ist als ($\boxed{A}, \boxed{B} \rightarrow c_1$) mit -4 Pkt., insofern der Cluster A und der Cluster B abgedeckt sind. Ab dem Knoten a_2 ist damit komplett in der Tiefe gesucht worden.

Als nächstes wird der a_3 der Suchknoten ($a_3 \dots$) betrachtet. Der Knoten a_3 birgt darin die Abhängigkeiten für den Cluster B nebst Cluster E. Als erstes wird die Kante a_3 zu b_1 nebst e_1 abgegangen. Der Teilgraph ($a_3 \rightarrow b_1 | e_1$) ist noch kein vollständiger Lösungsbeitrag, weil der Knoten e_1 wiederum eine Abhängigkeit für den Cluster C mit sich bringt. Es kann ausgehend von diesem Suchknoten allerdings keine bessere Lösung mehr als ($a_2 \rightarrow b_2 \rightarrow c_2$) mit $+3$ Pkt. erzielt werden. Beim Teilgraph ($a_3 \rightarrow b_1 | e_1$) sind der Cluster C und der Cluster D noch nicht abgedeckt. Ungeachtet dessen Abhängigkeiten können aus dem Cluster C bestenfalls der Knoten c_2 mit $+1$ Pkt. und aus dem Cluster D der Knoten d_1 mit $+1$ Pkt. hinzukommen. Der Teilgraph ($a_3 \rightarrow b_1, e_1$) wird sich also mit jetzt ± 0 Pkt. maximal zu $+2$ Pkt. entwickeln lassen. Als nächstes wird beim Suchknoten (a_3) für

den Knoten a_3 die Kante zu b_2 und e_1 abgegangen. Es sind somit die Cluster A, B und E abgedeckt. Mit der Abdeckung von Cluster A und B ist ($\boxed{A}, \boxed{B} \rightsquigarrow c_2$) als bestmögliche Fortsetzung bekannt, welche für den Teilgraph ($a_3 \rightarrow b_1 | e_1$) anwendbar ist. Es geht daraus der Lösungsbeitrag ($a_3 \rightarrow b_2, e_1 \rightarrow c_2$) mit +4 Pkt. hervor. Abschließend wird darin nach wegweisenden Ausschnitten geschaut. Die Fortsetzung ($\boxed{A}, \boxed{E} \rightsquigarrow b_2 \rightarrow c_2$) wird zusätzlich bei Abdeckung von Cluster A und E festgehalten. Noch dazu wird die Fortsetzung ($\boxed{A}, \boxed{B}, \boxed{E} \rightsquigarrow c_2$) bei Abdeckung von Cluster A, B und E vermerkt. Außerdem wird bei Abdeckung der Cluster A, B und C ($\boxed{A}, \boxed{B}, \boxed{C} \rightsquigarrow e_1$) als beste Fortsetzung festgehalten. Aus dem Cluster A ist mit jedem Knoten begonnen worden, einen Teilgraph zu generieren.

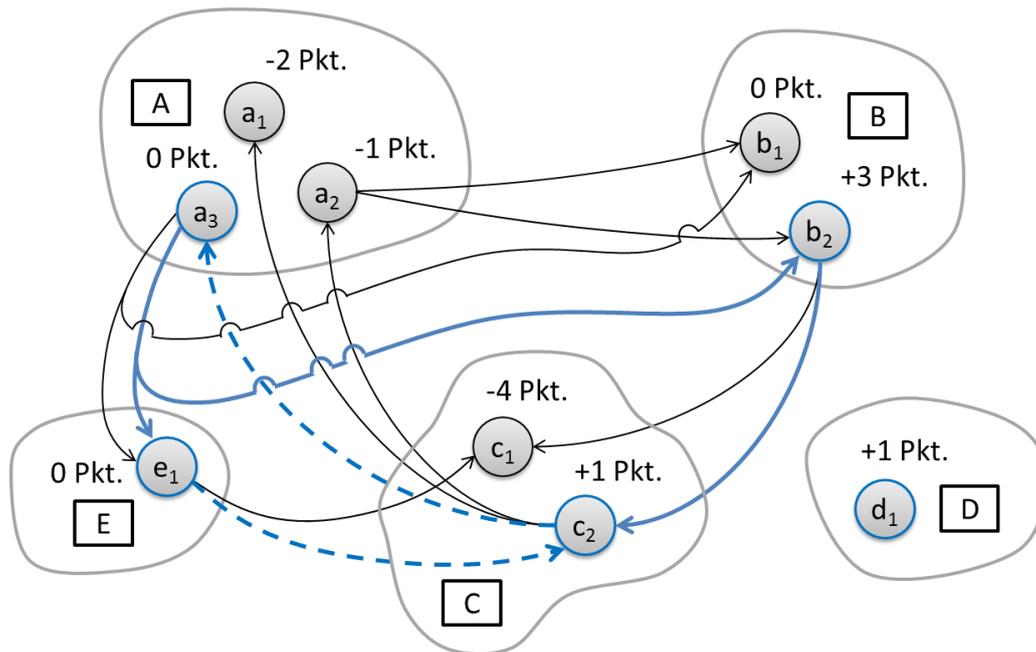


Abbildung 29: Suche von Teilgraphen in einem Dependenzgraphen

Nun wird auf der höchsten Ebene des Suchbaums mit dem Cluster B weitergesucht. Es wird der Suchknoten (b_1) betrachtet. Dieser weist keinerlei Abhängigkeiten auf. Der Teilgraph (b_1) stellt also eine Lösung mit ± 0 Pkt. dar. Dies ist für die Gesamtlösung des Suchproblems nicht mehr von Bedeutung. Als nächstes wird der Suchknoten ($b_2 \dots$) betrachtet. Es wird als erstes die Kante von b_2 zu c_1 abgegangen. Der daraus resultierende Teilgraph ($b_2 \rightarrow c_1$) ist ein Lösungsbeitrag mit negativen Gesamtkosten. Insofern das Cluster B abgedeckt ist, wird ($\boxed{B} \rightsquigarrow c_1$) als beste bekannte Fortsetzung festgehalten. Als zweites wird die Kante b_2 zu c_2 begangen. Beim Teilgraph ($b_2 \rightarrow c_2 \dots$) wird eine Abhängigkeit zum Cluster A aufgedeckt. Er kann mit maximal +5 Pkt. schätzungsweise bessere Gesamtkosten erreichen als die bisher beste gefundene Lösung mit +4 Pkt. Als erstes wird darum nach Erweiterungen über die Kanten von c_2 zu a_1 der Lösungsbeitrag ($b_2 \rightarrow c_2 \rightarrow a_1$) gesehen. Doch die von ihm abgedeckten Cluster B, C und A werden allesamt auch vom Lösungsbeitrag ($a_3 \rightarrow b_2, e_1 \rightarrow c_2$) zu vergleichsweise besseren Gesamtkosten abgedeckt. Mit der Erweiterung über die Kante von c_2 zu a_2 wird als zweites der Lösungsbeitrag ($b_2 \rightarrow c_2 \rightarrow a_2$) betrachtet. Dieser sticht den bereits gefundenen Lösungsbeitrag ($a_3 \rightarrow b_2, e_1 \rightarrow c_2$) ebenfalls nicht aus. Schließlich wird der Suchknoten ($b_2 \rightarrow c_2 \rightarrow a_3 \dots$) betrachtet, der aus der Erweiterung über die Kante von c_2 zu a_3 hervorgegangen ist. In diesem wurde mit dem Knoten a_3 eine Abhängigkeit für den Cluster E geweckt. Aus der Anwendung der Fortsetzung ($\boxed{A}, \boxed{B}, \boxed{C} \rightsquigarrow e_1$) geht aus diesem Teilgraph der Lösungsbeitrag ($b_2 \rightarrow c_2 \rightarrow a_3 \rightarrow e_1$) mit +4 Pkt. hervor. Er ist gleichbedeutend mit dem ($a_3 \rightarrow b_2 | e_1 \rightarrow c_2$) bereits gefundenen Lösungsbeitrag. Aus dem Cluster B ist mit jedem Knoten begonnen worden, einen Teilgraph zu generieren.

Ähnlich wie für den Cluster B verläuft die Suche auch für die Cluster C und E. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Cluster A, B, C und E in dem Dependenzgraph zusammenhängend sind.

Die beste Gesamtlösung ist die Menge $S = \{(a_3 \rightarrow b_2, e_1 \rightarrow c_2), (d_1)\}$.

2.3.3 Vergleich unterschiedlicher Optimierungsgesichtspunkte

In der Praxis gab es bis dato keine Möglichkeit, den Energiebereitstellungsprozess für die Fahrzeuge in Verbindung mit prognostizierten Transportbedarfen und in Ausrichtung auf die Elektrizitätsmärkte durchgängig zu planen und zu steuern. Die Einsatzplanung für die Wechselbatterien in einem Containerterminalbetrieb wirkt gegenüber dem Management von Transportsystemen oder eines Kraftwerksverbunds zusätzliche Anforderungen auf. Die Wechselbatterien sind in Abhängigkeit von einer voraussichtlichen Transportlast einen Tag im Voraus zu subaggregieren, um in der Ausrichtung auf die Kosten des Strombezugs und die Erlöse aus einem Angebot von Minutenreserve eine größtmögliche Senkung der Energiekosten herbeizuführen. Die integrierte Planungsproblemstellung weist eine hohe Entscheidungskomplexität auf und ist mit rein mathematischen Optimierungsmodellen (nachweislich mit einem OPL-Modell, kurz für Optimization Programming Language aus IBM CPLEX Studio) nicht in angemessener Zeit zu lösen. Darum ist im Rahmen des BESIC-Projekts ein heuristisches Lösungsverfahren konzipiert und umgesetzt worden.

Wie in **Abbildung 30** zu sehen ist, basiert es im Wesentlichen auf der Generierung einer Startlösung und einer lokalen Suche im Lösungsraum. Im Zuge dessen werden insgesamt vier Problemlösungsmodulare verwendet. Bei der Ablaufplankonstruktion werden zunächst im Groben der Einsatz der Fahrzeuge und der Wechselbatterien und dann mit den Ladeverläufen die Feinheiten für den Aufenthalt der Wechselbatterien in der Station geplant. Nach derzeitigem Stand der Automatisierung werden die batterie-elektrischen Fahrzeuge ab einem gewissen Reserveniveau des Ladezustands zu einem Batteriewechsel an die Ladestation beordert. Es ist nicht möglich, dem Erreichen des Reserveniveaus vorzugreifen und ein Fahrzeug vorweg für einen Batteriewechsel an die Station zu holen. Aus diesem Grund werden die Batterieeinsatzaktivitäten nach einfachen Prioritäts- und Auswahlregeln geplant, so dass der Fahrbetrieb und die Stationsaufenthalte der Wechselbatterien der Automatisierung im Feld gerecht werden. Es entsteht so ein Ablaufplan \bar{a} mit lückenlosen Einsatzsequenzen der Wechselbatterien und Festlegung von Ladeleistung zur Nachführung von elektrischer Energie an die Fahrzeuge. Aus ihm geht nach dem vorläufigen Stückeln von Minutenreserveangeboten ein angereicherter Ablaufplan \hat{a} hervor. Doch nicht jedes Stück eines Minutenreserveangebots darin trägt zu einem bestmöglichen Gesamtergebnis bei. Durch das Abwägen der Erlöse aus dem Angebot von Minutenreserveleistung gegenüber den Kosten des Strombezugs kommt es zu einem ausgemerzten Ablaufplan \check{a} , der bloß noch die Angebotsstücke enthält, bei denen die erwarteten Leistungspreiserlöse mögliche Vergünstigungen des Strombezugs überwiegen. Zudem ist bei ihm gewährleistet, dass alle Festlegungen von Ladeleistung am preisgünstigsten getroffen worden sind. Nachdem es bei dieser Abwägung zur Umverteilung von Ladeleistung aus den Zeitscheiben mit höheren prognostizierten Bezugspreisen in die Zeitscheiben mit niedrigeren prognostizierten Bezugspreisen gekommen sein kann, mögen sich nun die Zuschalt-/Abschaltpotenziale verändert ausdragen. Daher können womöglich für einen endangereicherten Ablaufplan \ddot{a} zusätzliche Stücke von Minutenreserveangeboten aufgebaut werden. Der Ablaufplan \ddot{a} stellt wiederkehrend eine Lösung des Ablaufplanungsproblems dar.

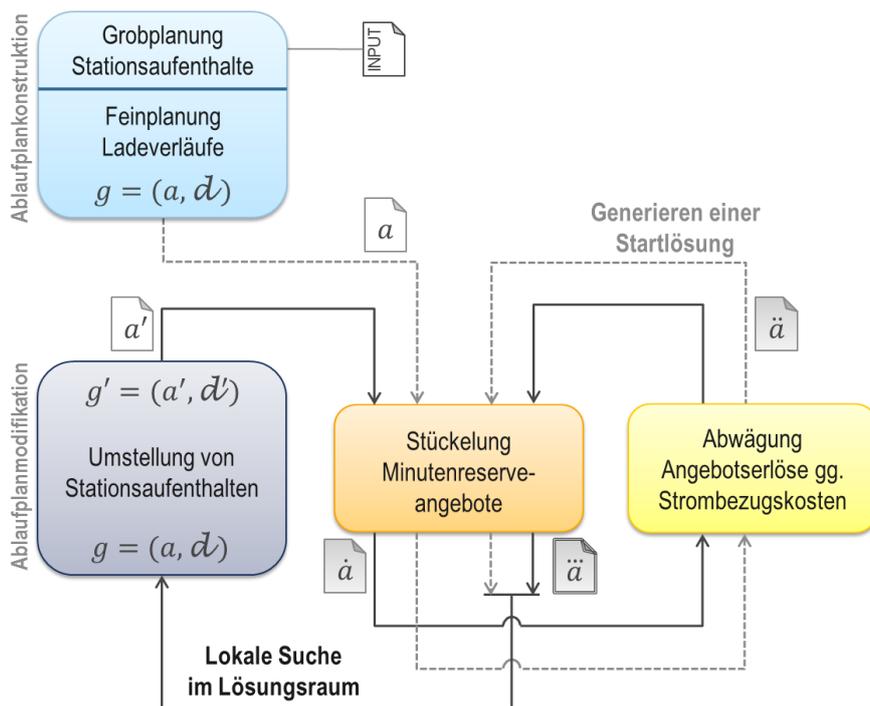


Abbildung 30: Übersicht der vier Problemlösungsmodule im heuristischen Lösungsverfahren

Im Weiteren wird versucht, ausgehend von einer Startlösung möglichst nah an eine Lösung mit optimalem Gesamtergebnis heranzukommen. Ein Übergang zu einer benachbarten Lösung sieht eine Umstellung von Batterieeinsatzaktivitäten wie beispielsweise das Verrücken eines Batteriewechsels vor. Es wird ein Präzedenzgraph \vec{d} für den Ablaufplan $a = \vec{a}$ erstellt, mit dem zusammen er den anfänglichen Planungsstand $g = (a, \vec{d})$ für die Modifikation des Ablaufplans bildet. Ein Präzedenzgraph zeigt die Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zwischen den Batterieeinsatzaktivitäten an, die es im konkreten Zeitbezug wie auch in Bezug auf den Ladezustand der Wechselbatterien zu beachten gilt. Der Ablaufplan a wie auch der Präzedenzgraph \vec{d} werden dann gleichsam modifiziert, so dass daraus ein neuer Planungsstand $g' = (a', \vec{d}')$ hervorgeht. Bei der Ablaufplanmodifikation mögen aufgrund von zeitlichen Verschiebungen der Stationsaufenthalte der Wechselbatterie und der Anpassung des Ladeverlaufs einige Stücke von Minutenreserveangeboten auf der Strecke geblieben sein. Da die Einsatzaktivitäten untereinander weitläufig über Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen und Synchronitätsbeziehungen miteinander verknüpft sind, müssen beim Verschieben einer Batteriewechselaktivität praktisch immer weitere Einsatzaktivitäten zeitlich gedrängt oder ausgedehnt werden. Nachdem ein Stationsaufenthaltszeitraum für eine Wechselbatterie in dieser Weise verändert wurde, muss auch der Ladeverlauf darin gegebenenfalls reoptimierend neu eingestellt werden. Der modifizierte Ablaufplan $\vec{a} = a'$ ist also auf gleiche Weise wie der initiale Ablaufplan anzureichern. Dazu werden nacheinander eine vorläufige Stückelung von Minutenreserveangeboten, eine Abwägung der Minutenreserveerlöse gegenüber den Strombezugskosten und eine erneute Stückelung von Minutenreserveangeboten mit endgültig ausgeprägtem Zuschalt-/Abschaltpotenzial vorgenommen. Sollte nach einer gewissen Anzahl von Versuchen keine Verbesserung des Gesamtergebnisses erreicht werden können, wird die lokale Suche mit einem endangereicherten Ablaufplan \vec{a} als Lösung beendet.

Für das Generieren einer Startlösung sind am Anwendungsfallbeispiel des Container Terminal Altenwerder (CTA) folgende Optimierungsgesichtspunkte untersucht worden:

(verwendete Problemlösungsmodule, siehe dazu Abbildung 67:

■ Grob-/Feinplanung, ■ Stückelung Minutenreserve, ■ Abwägung Minutenrs. gg. Strombzgskosten)

■ Gegenwärtiger Automatisierungsstand

Bei einem ersten Gesichtspunkt („sofortig“ ■) wird das Laden der Wechselbatterien derart geplant, wie es sich nach dem jetzigen Stand der Automatisierung im Feld ergeben würde. Es wird sofortig bei Kontaktierung einer Wechselbatterie in der Station das Laden begonnen und so rasch wie möglich vollständig geladen. Insofern es mit einem Ablaufplan überschaut wird, ist es selbst bei sofortigem Laden möglich, Minutenreserve anzubieten („sofortig+“ ■■). Dazu müssten die Wechselbatterien beispielsweise zeitlich so gestaffelt an die Station abgegeben werden, dass sich die nach dem Automatismus geplanten Ladeprozesse aneinander reihen und sich ihr zeitweises Potenzial einer Abschaltung ergänzt. Die Ladeleistung wird zusammenhängend am Beginn des Stationsaufenthaltszeitraums platziert.

■ einfältige Ausrichtung auf Wirkleistungsmarkt

Bei einem zweiten Gesichtspunkt richtet sich die Ablaufplanung allein auf den Wirkleistungsmarkt aus. Dabei wird die Ladeleistung in den Zeitscheiben festgelegt, für welche die niedrigsten Strombezugspreise prognostiziert worden sind („bezugskostenoptimiert“ ■). Es ist zu erwarten, dass die Ladeprozesse laut Plan bis zu zwei oder drei Mal unterbrochen werden. Die Ladeleistung liegt zwar jeweils innerhalb des Stationsaufenthaltszeitraums verteilt vor, ist jedoch in ganzen Stunden zusammenhängend. Unter diesem Gesichtspunkt sind insgesamt die niedrigsten Strombezugspreise zu erwarten. Auch beim bezugskostenoptimierten Laden ist es prinzipiell möglich, Minutenreserve anzubieten („bezugskostenoptimiert+“ ■■).

■ einfältige Ausrichtung auf Regelleistungsmarkt

Bei einem dritten Gesichtspunkt richtet sich die Ablaufplanung allein auf den Regelleistungsmarkt aus. Dabei wird die Ladeleistung in den Zeitscheiben platziert, für welche der höchste Regelleistungspreis für positive Minutenreserve respektive der niedrigste Regelleistungspreis für negative Minutenreserve prognostiziert worden sind („erlösoptimiert“ ■■). Es ist zu erwarten, dass die Ladeprozesse laut Plan etwa ein oder zwei Mal unterbrochen werden. Die Ladeleistung wird überwiegend zusammenhängend in die vierstündigen Produktperioden für Minutenreserve platziert.

■ zweifältige Ausrichtung auf Wirk- und Regelleistungsmarkt

Bei einem vierten Gesichtspunkt wird zwischen den Erlösen durch Minutenreserve und den Kosten des Strombezugs abgewogen. Es wird nur dann Minutenreserve angeboten, sollte dadurch nicht etwa ein Kostennachteil beim Strombezug entstehen („kombiniert“ ■■■).

All diese Optimierungsgesichtspunkte führen zu Ablaufplänen der Energiebereitstellung für die batteriebetriebenen Fahrzeuge, die sowohl über das Testbett der virtuellen Gesamtsystemumgebung als auch im Rahmen der Flottenversuche für das gesteuerte Laden ausgeführt werden können. Eine Grundregel der Planung besagt, dass alle Wechselbatterien, die sich zum Ende des Planungszeitraums in der Station befinden, so voll wie möglich geladen sein sollen. Aus diesem Grund wird Tag für Tag eine gleiche Menge an elektrischer Energie in die Wechselbatterien nachgeführt, obwohl verschiedene Optimierungsgesichtspunkte zum Tragen kommen.

In einem Vergleich der Optimierungsgesichtspunkte für das Jahr 2013 ist die Planung tageweise rollierend durchgeführt worden. Die Anfangsbelegung der Ladestellen, die Anfangszuordnung von Wechselbatterien zu Fahrzeugen und die Anfangsladezustände des ersten Tages sind einem Simulationsvorlauf entnommen worden. An den darauffolgenden Tagen werden jeweils die Belegung der Ladestellen, die Zuordnung der Wechselbatterien zu Fahrzeugen und die Ladezustandswerte aus vorangegangenen Planungsergebnissen übertragen. Über

das gesamte Jahr sind so insgesamt 543.028 kWh elektrischer Energie in die Wechselbatterien der Transportfahrzeuge nachzuführen. Die Zeitpunkte für die Batteriewechsel sind bei allen Optimierungsgesichtspunkten die gleichen.

Die Konditionen für den Strombezug werden anhand von Marktdaten für das Jahr 2013 der Strombörse EPEX SPOT gebildet. Es werden die tatsächlichen Markträumungspreisergebnisse der Stundenkontrakte herangezogen. Die Konditionen für ein Angebot von Minutenreserve werden anhand von anonymisierten Angebots-/Zuschlagslisten gebildet. Es wird für jedes Minutenreserveprodukt jeweils der durchschnittliche Regelleistungspreis aller mit Zuschlag versehenen Angebote berechnet. Es werden die tatsächlichen Ausschreibungsergebnisse für das Jahr 2013 von der Transparenzplattform regelleistung.net verwendet.

In **Tabelle 3** sind die Planungsergebnisse der verschiedenen Optimierungsgesichtspunkte im Ganzjahresvergleich zusammengefasst. Es sei nochmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die aufgeführten Kosten hinsichtlich des Strombezugs allein auf Basis der Großhandelspreise beruhen; somit wird ein maßgeblicher variabler Preisbestandteil betrachtet, nicht jedoch reelle Bezugspreiskonditionen eines Großabnehmers wie einem Containerterminalbetrieb mit sämtlichen fixen Preisbestandteilen wie Stromsteuer, EEG-Umlage, etc. wiedergegeben.

Die Kosten des Strombezugs in Höhe von 20.862,58 EUR bei den Gesichtspunkten „sofortig“ und „sofortig+“ sind als eine Referenz anzusehen. Erwartungsgemäß haben sich unter den Gesichtspunkten des Wirkleistungsmarkts allein „bzgskostenopt.“ und „bzgskostenopt.+“ mit 16.687,43 EUR die niedrigsten Strombezugskosten ergeben; hier betragen die Kosten des Strombezugs nur 80 % des Referenzwerts. Ebenfalls ist zu erwarten gewesen, dass sich unter dem Gesichtspunkt des Regelleistungsmarkts allein „erlösoptimiert“ mit 24.473,53 EUR die höchsten Strombezugskosten einstellen; hier liegen die Kosten des Strombezug bei 117 % des Referenzwerts. Nach Abwägung der Strombezugskosten gegenüber den Minutenreserveerlösen „kombiniert“ zeigen sich in Höhe von 16.973,02 EUR mit 81 % des Referenzwerts vergleichsweise niedrige Strombezugskosten.

Beim Gesichtspunkt „erlösoptimiert“ sind die Erlöse aus dem Angebot von Minutenreserve in Höhe von 1.849,88 EUR als Referenz anzusehen. Unter den Gesichtspunkten „sofortig“ und „bzgskostenopt.“ werden gar keine Angebote von Minutenreserve getätigt. Werden die den derzeitigen Automatisierungsregeln entspringenden Abläufe planvoll überschaut „sofortig+“, so gehen daraus mehr oder minder zufällig Minutenreserveerlöse in Höhe von 41,49 EUR hervor, was gerade einmal 2 % des Referenzwertes entspricht. Obwohl unter dem Gesichtspunkt „bzgskostenopt.+“ allein auf den Wirkleistungsmarkt hin optimiert wird, fallen eher zufällig mit 501,82 EUR überraschend hohe Minutenreserveerlöse ab; damit sind unter diesem Gesichtspunkt 27 % des Referenzwerts zu erreichen. Nach Abwägung der Strombezugskosten sind mit 1.212,70 EUR immerhin vergleichsweise hohe Minutenreserveerlöse zu machen.

Tabelle 8: Gesamtübersicht Planungsergebnisse im Ganzjahresvergleich verschiedener Optimierungsgesichtspunkte

	Kosten des Strombezugs		Erlöse durch Minutenreserve		Gesamtergebnis		nachgeführte Energiemenge	relatives Gesamtergebnis
sofortig 	20.862,58 EUR	100%	n.v.	0%	20.862,58 EUR	100%	542.952 kWh	3,84 Cent/kWh
sofortig+ 	20.862,58 EUR	100%	41,49 EUR	2%	20.821,21 EUR	100%	542.952 kWh	3,83 Cent/kWh
bzgstkostenopt. 	16.687,43 EUR	80%	n.v.	0%	16.687,43 EUR	80%	542.952 kWh	3,07 Cent/kWh
bzgstkostenopt.+ 	16.687,43 EUR	80%	501,82 EUR	27%	16.185,57 EUR	78%	542.952 kWh	2,98 Cent/kWh
erlösoptimiert 	24.473,53 EUR	117%	1.849,88 EUR	100%	22.623,47 EUR	109%	542.952 kWh	4,16 Cent/kWh
kombiniert 	16.973,02 EUR	81%	1.212,70 EUR	66%	15.760,34 EUR	76%	542.952 kWh	2,90 Cent/kWh

Hinsichtlich der Kosten des Strombezugs konnten unter den Gesichtspunkten „bzgstkostenopt.“ und „bzgstkostenopt.+“ gegenüber der Referenz eine maximale Ersparnis in Höhe von 4.175,15 EUR erlangt werden; unter dem Gesichtspunkt „erlösoptimiert“ konnte hinsichtlich der Minutenreserveerlöse maximal ein Mehr von 1.849,88 EUR erreicht werden. Damit schlagen sich die Strombezugskosten eher als die Minutenreserveerlösen im Gesamtergebnis nieder. Dennoch schneidet der Gesichtspunkt „kombiniert“ im Gesamtergebnis am besten ab.

In **Abbildung 31** werden die drei Gesichtspunkte „bzgstkostenopt.+“, „erlösoptimiert“ und „kombiniert“ noch einmal hinsichtlich der Strombezugskosten und der Minutenreserveerlöse in Bezug zum Gesichtspunkt „sofortig“ gesetzt.

Bei den Strombezugskosten lassen sich am 16.06.2013 unter den Gesichtspunkten „bzgstkostenopt.+“ und „kombiniert“ 92,77 EUR einsparen. Am 17.02.2013 gelingt es hingegen unter dem Gesichtspunkt „bzgstkostenopt.+“ mit 0,41 EUR kaum besser zu sein als unter dem Gesichtspunkt „sofortig“. Beim Gesichtspunkt „kombiniert“ ist am 18.08.2013 sogar ein Minus von -6,40 EUR hinzunehmen. Unter dem Gesichtspunkt „erlösoptimiert“ ist am 27.10.2013 maximal ein Plus von 19,57 EUR gegenüber dem Gesichtspunkt „sofortig“ zu ermitteln. Doch der Gesichtspunkt „erlösoptimiert“ ist hier im Mittel mit -9,89 EUR im Hintertreffen. Minimal ist am 16.06.2013 ein deutliches Minus von 78,48 EUR festzustellen. Der Gesichtspunkt „bzgstkostenopt.+“ ist auch im Bezug zum Gesichtspunkt „sofortig“ erwartungsgemäß im Mittel mit 11,44 EUR stärker im Plus als der Gesichtspunkt „kombiniert“ mit 10,66 EUR im Mittel.

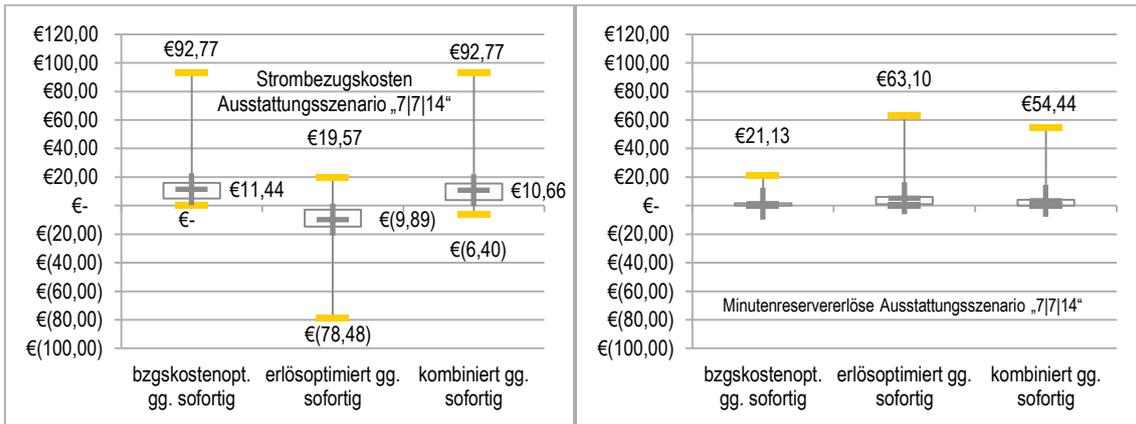


Abbildung 31 Kastendiagramme für die Differenz in den Strombezugskosten (links) und den Erlösen für Minutenreserve (rechts) zwischen den genannten Optimierungsgesichtspunkten

Bei den Minutenreservererlösen kann am 21.07.2013 unter dem Gesichtspunkt „kombiniert“ mit 54,44 EUR maximal ein annähernd so großes Plus eingefahren werden wie beim Gesichtspunkt „erlösoptimiert“ mit 63,10 EUR. Im Mittel ist der Gesichtspunkt „kombiniert“ mit 3,32 EUR gegenüber dem Gesichtspunkt „sofortig“ dennoch ein bisschen schwächer im Plus als der Gesichtspunkt „erlösoptimiert“ mit 5,07 EUR. Unter dem Gesichtspunkt „bzgskostenopt.+“ ist am 07.07.2013 gegenüber dem Gesichtspunkt „sofortig“ maximal ein Plus von 21,13 EUR zu ermitteln.

Das Balkendiagramm in **Abbildung 32** zeigt die Differenz der Strombezugskosten und die Differenz der Minutenreserveerlöse zwischen den Optimierungsgesichtspunkten „kombiniert“ und „bzgskostenopt.“ über das ganze Jahr 2013. Die Differenz in den Strombezugskosten ist für den Optimierungsgesichtspunkt „kombiniert“ gegenüber dem Optimierungsgesichtspunkt „bzgskostenopt.“ stets negativ, da unter dem Optimierungsgesichtspunkt „bzgskostenopt.“ an jedem der Tage in 2013 die kleinstmöglichen Kosten des Strombezugs verzeichnet werden können. Die Differenz in den Strombezugskosten findet sich dementsprechend in den dunklen Balken im negativen Bereich wieder. Wegen der Abwägung der Strombezugskosten gegenüber den Minutenreserveerlösen können beim Optimierungsgesichtspunkt „kombiniert“ nur höhere Erlöse als beim Optimierungsgesichtspunkt „bzgskostenopt.“ herauspringen. Die Differenz in den Minutenreserveerlösen ist in den hellen Balken im positiven Bereich zu finden. Im Gesamtbild fällt es auf, dass an den Sommertagen sowohl in Bezug auf die Kosten des Strombezugs als auch der Minutenreserveerlöse größere Differenzen als an den Wintertagen auftreten. An Sommertagen sind die Strombezugspreise im Mittel niedriger einzuschätzen und auch die preisliche Spannweite fällt geringer aus als an Wintertagen. Im Gegensatz dazu gibt es an Sommertagen höhere maximale Bewertungen der Minutenreserveprodukte. Es ist dadurch vor allem an Sommertagen attraktiv, sich zusätzlich dem Regelleistungsmarkt zuzuwenden. Im Frühjahr 2013 sind im energiewirtschaftlichen Gesamtergebnis kaum Unterschiede zwischen den Optimierungsgesichtspunkten zu erkennen. Am 30.01. schneidet der Optimierungsgesichtspunkt „kombiniert“ bezüglich der Minutenreserveerlöse 3,67 EUR besser und bezüglich der Strombezugskosten -0,04 EUR schlechter ab als der Optimierungsgesichtspunkt „bzgskostenopt.“. Damit ist das Plus bei den Minutenreserveerlösen für „kombiniert“ ziemlich unangefochten. Am 17.03. steht einem Plus von 5,20 EUR bei den Minutenreserveerlösen für „kombiniert“ ein Defizit von -2,97 EUR bei den Strombezugskosten gegenüber. An einem Sommertag wie dem 20.07. ist mit einem Plus von 18,58 EUR bei den Minutenreserveerlösen und einem Defizit von -4,40 EUR bei den Strombezugskosten ein größerer Ausschlag zu sehen. Leicht abgeschwächt zeigt sich dies auch an Herbsttagen wie dem 20.10. Absolut gesehen tragen diese Tage im Sommer und Herbst für den Optimierungsgesichtspunkt „kombiniert“ am stärksten dazu bei, ein besseres energiewirtschaftliches Gesamtergebnis als unter „bzgskostenopt.“ zu erreichen. In den winterlichen Tagen ergibt sich eigentlich ein ähnliches Bild wie im Frühjahr. Allerdings gibt es im Dezember einige stärkere Ausschläge rund um die Weihnachtstage und den bevorstehenden Jahreswechsel.

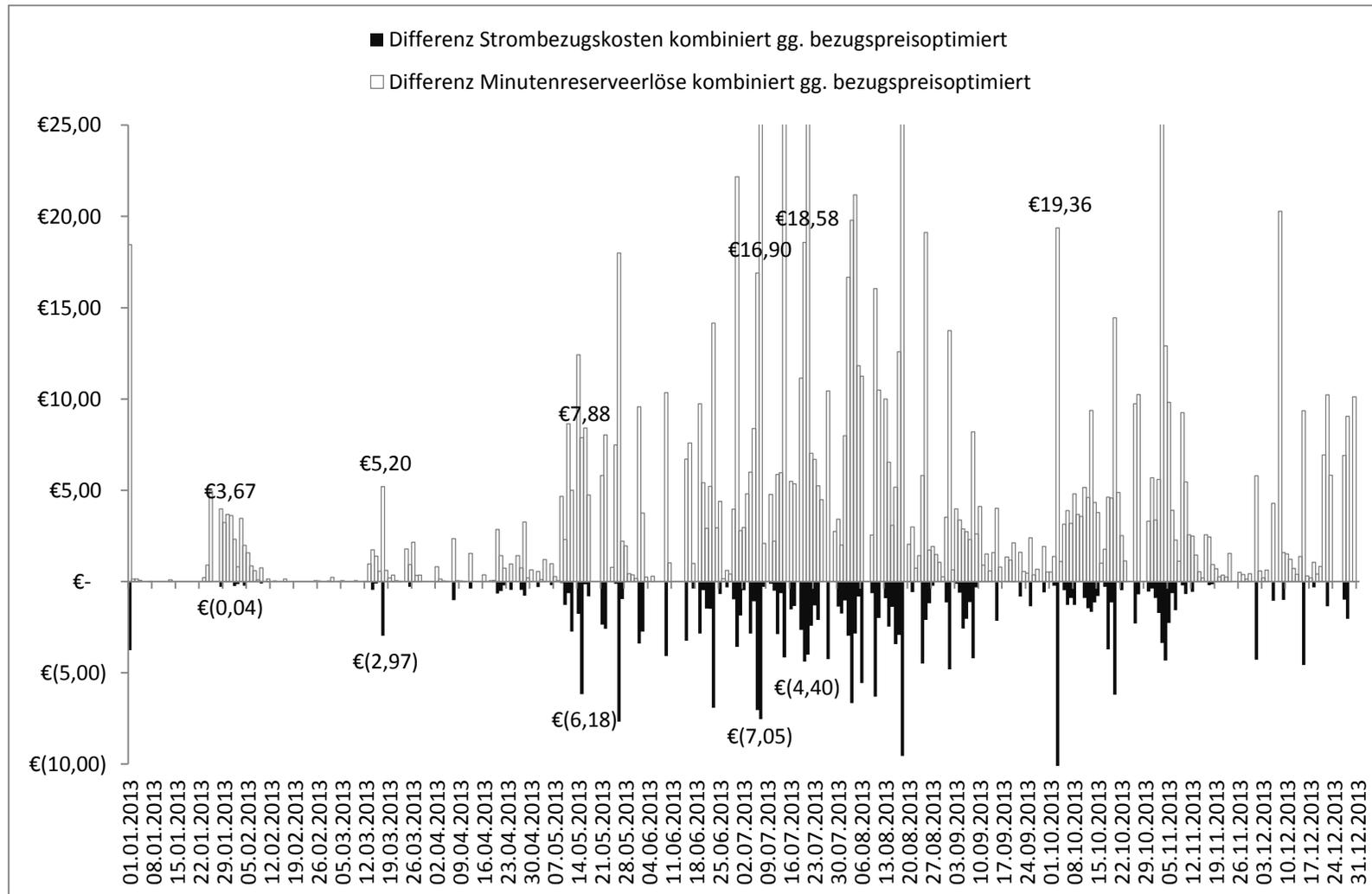


Abbildung 32 Balkendiagramm mit der Differenz der Strombezugskosten und der Minutenreserveerlöse über das Jahr 2013 zwischen den Optimierungsgesichtspunkten „bezugspreisopt.“ und „kombiniert“

3 Flottenversuche rein elektrisch angetriebener Containertransporter unter Realbedingungen

3.1 Aufbau der Fahrzeuge und Wechselbatterien

Zur Durchführung von Flottenversuchen waren weitere Containertransporter mit batterie-elektrischem Antriebsstrang und zugehörige Wechselbatterien benötigt worden. Zu Beginn des BESIC-Projekts wurden darum einige Fahrzeug mit herkömmlichem Antriebsstrang außer Dienst gestellt und zu Fahrzeugen mit batterie-elektrischem Antriebsstrang umgerüstet. Außerdem wurden frühzeitig Wechselbatterien auf Basis von Blei-Batteriesystemen aufgebaut und in den Pool aufgenommen.

3.1.1 Erstellung Pflichtenheft und Konstruktionspläne

Es wurde ein Pflichtenheft für den Aufbau/Umbau der weiteren Versuchsfahrzeuge erstellt. Darin wurden die nötigen Änderungen beschrieben, um aus den vorhandenen diesel-hydraulischen bzw. diesel-elektrischen Antriebssträngen einen batterie-elektrischen Antriebsstrang zu machen. Außerdem wurde im Pflichtenheft festgelegt, in welchem Umfang die Bauteile aus den stillzulegenden Fahrzeugen weiter verwendet werden können. Dabei flossen Erkenntnisse aus dem früheren Betrieb der beiden Fahrzeugprototypen mit batterie-elektrischem Antriebsstrang ein.

Auf der Grundlage des genannten Pflichtenhefts wurde die mechanische und elektrische Konstruktion der Fahrzeuge angepasst und die erforderlichen Fertigungsunterlagen in Form von technischen Zeichnungen, Stücklisten und Schaltplänen erstellt. In der **Abbildung 33** ist ein dreidimensionales Modell zu dem Fahrzeugumbau dargestellt.

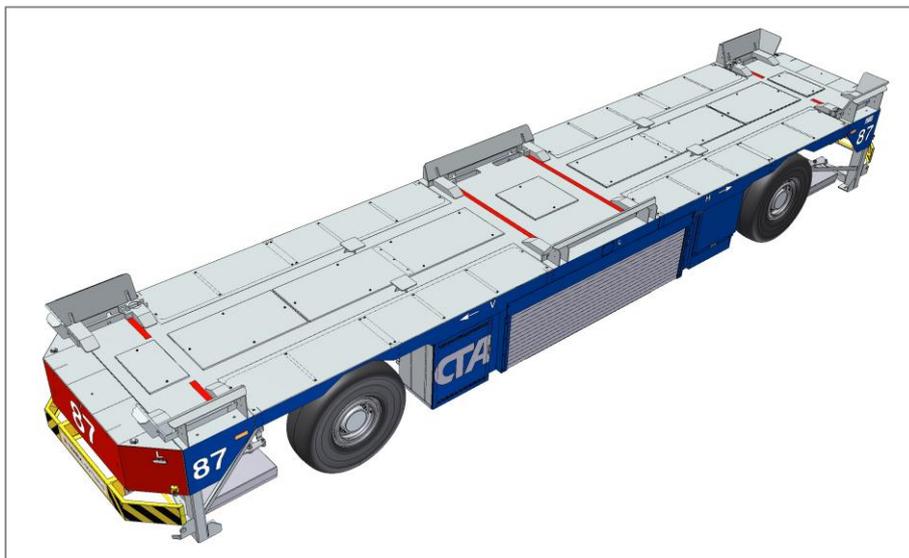


Abbildung 33: CAD-Modell eines Containertransporters mit batterie-elektrischem Antriebsstrang (B-AGV)

Abweichend von den bestehenden Fahrzeugen wird im Bereich der hydraulischen Anlage eine Speicherschaltung eingesetzt und der hydraulische Druck in Abhängigkeit von der Zuladung mit Containern geregelt. Die hydraulische Anlage wird für die Betätigung der Lenkung, der Klappeinweiser sowie der Not- und Haltebremse eingesetzt. Die Klappeinweiser werden je nach Containergröße hydraulisch aktiviert; sie dienen bei der Beladung als Positionierhilfe und während des Fahrens als Sicherung gegen ein Verrutschen. Die Not- und Haltebremse ist als

Lamellenbremse ausgeführt und wird vor dem Losfahren hydraulisch geöffnet und bei Fahrzeugstillstand wieder geschlossen.

Außerdem wird die 24 V Bordnetzversorgung direkt über die wechselbaren Traktionsbatterien abgedeckt, sodass die Bordnetz Batterien nur noch während eines Batteriewechselsvorgangs oder im Fehlerfall zum Einsatz kommen müssen.

3.1.2 Umrüstung Fahrzeuge und Aufbau Wechselbatterien (auf Basis von Blei-Batteriesystemen)

Mit Blick auf die bisher geleisteten Betriebsstunden, den erkennbaren Verschleißzustand, den Reparaturbedarf und anstehende Revisionen wurden aus der vorhandenen Flotte nach und nach Fahrzeuge für die Umrüstung ausgewählt.

Mit erfolgreicher Inbetriebnahme einiger Fahrzeuge mit batterie-elektrischem Antriebsstrang (B-AGV) wurden schrittweise weitere Fahrzeuge mit diesel-hydraulischem (H-AGV) oder diesel-elektrischem (E-AGV) Antriebsstrang außer Betrieb gesetzt. Letztlich waren acht diesel-hydraulische AGV vom Typ CT 60 HN auf einen batterie-elektrischen Antrieb umzurüsten gewesen. Die auf den batterie-elektrischen Antriebsstrang umgebauten Fahrzeuge führen heute die Typenbezeichnung CT 70 BN.

Nach der Fertigung des Stahlbaus für das Fahrzeugchassis wurde mit der Montage der Fahrzeuge begonnen. Hierzu wurden die Altkomponenten aus den umzubauenden Fahrzeugen von Hamburg nach Düsseldorf zurückgeholt und zusammen mit den Neuteilen zum Gesamtfahrzeug komplettiert. Die nicht wieder verwendbaren Fahrzeugkomponenten, wie in **Abbildung 34** zu sehen z.B. die Chassis, wurden allesamt fachgerecht eingelagert.



Abbildung 34: Chassis von Containertransportern mit diesel-hydraulischem Antriebsstrang, die auf Stapelholz gelagert worden sind

Es war beabsichtigt worden, neben den zwei vorhandenen Prototypenfahrzeugen weitere sieben Fahrzeuge mit Batteriesystemen auf Basis von Blei-Säure-Akkumulatoren zu betreiben, so dass dieser Teil von B-AGV in der Flotte genauer untersucht werden kann. Und eines der insgesamt acht umzurüstenden Fahrzeuge sollte dediziert mit Batteriesystemen auf Basis von Lithium-Ionen-Akkumulatoren betrieben werden.

Wie in **Abbildung 35** zu sehen, wurden parallel zum Umbau der Fahrzeuge bereits vierzehn Wechselbatterien aus Batteriesystemen auf Basis von Blei-Säure-Akkumulatoren aufgebaut. Dazu wurden zunächst die Tragrahmen als Stahlbau gefertigt. Dann wurden darin jeweils neun 80 V-Antriebsbatterien integriert und elektrisch an die Multikupplung angeschlossen.

Zusammen mit einem Fahrzeug wurde auch jeweils eine Wechselbatterie mit Blei-Batteriesystem vom Werk in Düsseldorf in die Praxisumgebung nach Hamburg ausgeliefert. Es war beabsichtigt worden, zu jedem Versuchsfahrzeug zwei Wechselbatterien in der Praxisumgebung zur Verfügung zu haben. Darum wurde für jedes Versuchsfahrzeug mit einer Wechselbatterie an Bord eine Wechselbatterie mit Blei-Batteriesystem gesondert nach Hamburg gebracht.



Abbildung 35: Zwei fertig aufgebaute Wechselbatterien

Eine Neuerung bei diesem Aufbau der Wechselbatterien besteht darin, dass auf jeder der neun 80 V-Antriebsbatterien ein eigener Batteriecontroller installiert ist. Diese erfassen sowohl bei einem Ladevorgang in der Batteriewechselstation als auch bei einem Entladevorgang im Fahrzeug die Betriebsdaten der Batterie, die in erster Linie einem Fahrzeug und/oder einer Ladegeräteeinheit an sich aber auch dem übergeordneten Batterien-Verwaltungs-System bereitgestellt werden können. Wie der **Abbildung 36** zu entnehmen ist, sind alle neun Batteriecontroller einer Wechselbatterie an einen CAN-Bus angeschlossen, der über die Multikupplung entweder mit der Fahrzeugsteuerung oder der Ladegerätesteuerung verbunden ist. Den Batteriecontrollern kommt im Rahmen des BESIC-Projekts eine besondere Bedeutung zu, da über sie ein Großteil der für das Batterien-Verwaltungs-System erforderlichen Gesundheits- und Ladezustandsdaten der Batteriesysteme erfasst und übermittelt werden.

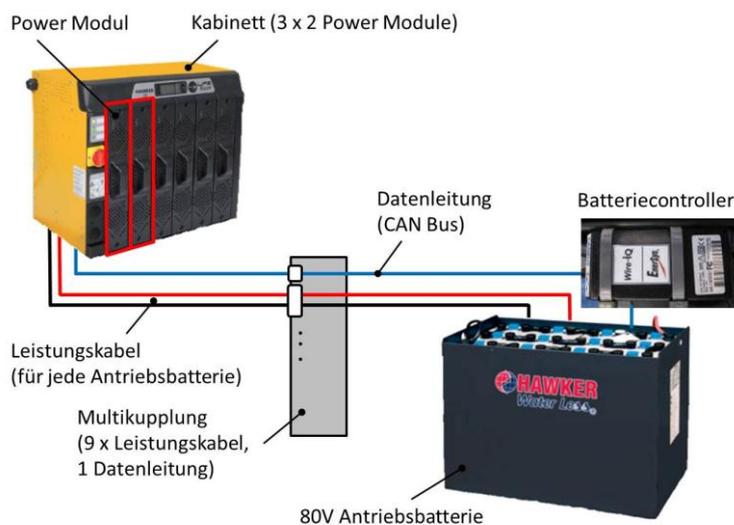


Abbildung 36: Anbindung der Batterien an Fahrzeugsteuerung

3.1.3 Durchführung Probetrieb mit Störmeldeliste

Es wurde eine mehrstündige Funktionsprüfung (Factory Acceptance Test, kurz FAT) durchgeführt, die den Inbetriebnahmeaufwand für den regulären Transport- und Umschlagsbetrieb deutlich verkleinert. Die Umrüstung der Fahrzeuge und der Aufbau der Wechselbatterien endeten darum mit einer Vorinbetriebnahme und einem festgelegten Testprogramm auf dem werkseigenen Prüffeld in Düsseldorf.

Die Inbetriebnahme der umgerüsteten Fahrzeuge auf dem Terminalgelände von CTA begann mit einer Kontrolle der verbauten mechanischen und elektrischen Komponenten. Hierbei wurde nochmals besonders die Hydraulikanlage auf Leckagefreiheit geprüft. Dies wurde noch nicht im vollautomatisierten Produktivsystem durchgeführt. Anschließend führten die Fahrzeuge auf einer hierfür vorgesehenen Testfläche über mehrere Stunden vorgegebene Fahrmanöver durch.



Abbildung 37: Containertransporter mit batterie-elektrischem Antriebsstrang bei Inbetriebnahme auf dem Terminalgelände

Nach erfolgreichem Einsatz auf der Testfläche im Terminalgelände wurden die Fahrzeuge an sich in den Probetrieb übergeben und dazu in das abgesperrte Horizontaltransportareal eingeschleust. Nach 24 Stunden im realen Umschlagsbetrieb wurden die Fahrzeuge vorübergehend zu einer abschließenden Kontrolle herausgezogen. Insofern im Probetrieb keine zu einem Geräteausfall führenden Fehler auftraten, waren die Fahrzeuge mit Blei-Batteriesystemen schließlich in den Feldtest übergeben worden.

3.2 Erweiterung der Ladeinfrastruktur in der Station

Das Wechselkonzept der Station beruht darauf, dass ein Fahrzeug bei einem niedrigen Batterieladezustand selbstständig in die Batteriewechselstation einfährt, die entladene Batterie aus dem Fahrzeug entnommen und eine vollständig geladene Batterie in das Fahrzeug eingesetzt wird. Dieser vollautomatisierte Wechsel dauert lediglich wenige Minuten, so dass das Fahrzeug schnell wieder für den Umschlag genutzt werden kann. Währenddessen wird die entladene Wechselbatterie automatisch auf einen Ladeplatz gebracht und geladen. Insofern zu Beginn des BESIC-Projekts weitere Versuchsfahrzeuge in Betrieb genommen wurden, die mit Wechselbatterien auf Basis von Blei-Batteriesystemen ausgestattet werden, mussten dementsprechend mehr Ladeplätze zur Verfügung gestellt werden.

3.2.1 Erstellung von Aufstellskizzen und eines Stromlaufplans

Begleitend zum Aufbau/Umbau der weiteren Versuchsfahrzeuge und ihrer Wechselbatterien waren die elektrischen Betriebsmittel in der Station auf dem Terminalgelände geplant worden. In dieser Station können Wechselbatterien von Fahrzeugen abgegeben, frisch aufgeladen und von Fahrzeugen wieder aufgenommen werden; je nach Kontext wird sie als Batteriewechselstation oder Batterieladestation bezeichnet.

Im Rahmen des Projekts BESIC war die Station um sieben Ladeplätze zum Laden von Wechselbatterien auf Basis von Blei-Batteriesystemen sowie einen Ladeplatz zum Laden von Wechselbatterien auf Basis von Lithium-Batteriesystemen zu erweitern gewesen. Es waren bereits zwei Ladeplätze in der Station eingerichtet gewesen, an denen weiterhin speziell die vier Wechselbatterien der vorhandenen Prototypenfahrzeuge zu laden sind. Insgesamt war die Versorgung der Station damit auf zehn Ladeplätze auszulegen gewesen. Die Ladegeräteeinheiten für die Blei-Batteriesysteme waren hierbei auf einen bestehenden und zwei zusätzlich anzuliefernde Aufstellcontainer zu verteilen. In **Abbildung 38** wird mit einer Aufstellskizze ein Auszug dieser Ausführungsplanungen wiedergegeben.

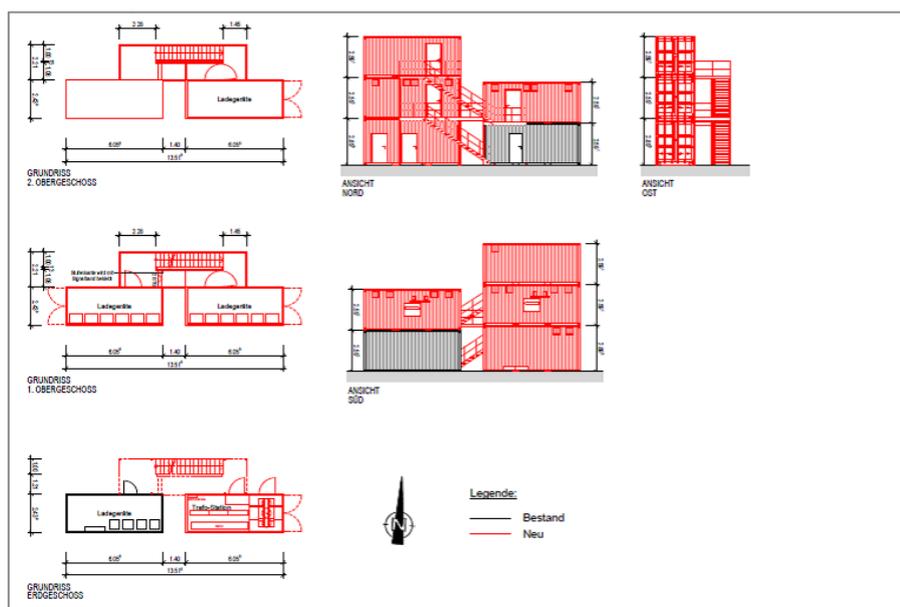


Abbildung 38: Aufstellskizze Container für Anlagentechnik

Die Gesamtversorgung der vorhandenen und der neuen Ladegeräteeinheiten sowie des Regalbediengeräts war über eine Transformatoranlage zu realisieren gewesen, die in einem separaten Aufstellcontainer unterzubringen gewesen war.

Die Unterbringung und Aufstellung der Ladegeräteeinheiten sowie der Transformatoreinheit wurde in umgebauten Seecontainer geplant. Diese würden sich gängig und kostengünstig in die bestehende Anlage des Containerterminals einfügen. Sollte sich im Zuge des Projekts BESIC oder möglicher Anschlussprojekte ein zusätzlicher Platzbedarf ergeben, so besteht die Möglichkeit der Montage von zusätzlichen Containern.

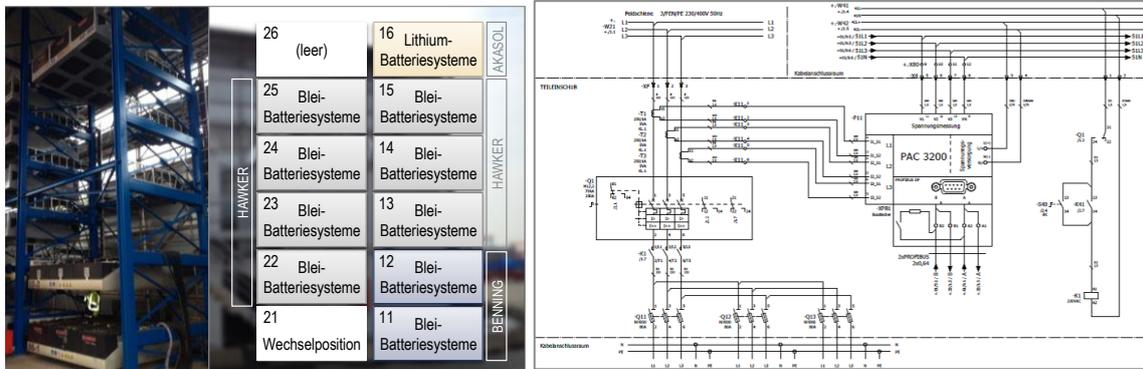


Abbildung 39: Auszug aus den Stromlaufplänen / Übersicht der Regalfächer in der Station

In der **Abbildung 39** ist der Aufbau des Hochregallagers innerhalb der Station gezeigt. Dieses besitzt zwei Regalspalten mit jeweils sechs Fächern. Daneben ist auch ein Auszug aus den Stromlaufplänen abgebildet.

Die elektrische Versorgung beläuft sich bis dato über folgende anlagentechnische Komponenten:

- Leichtbauhalle an sich für Zugangskontrolle, Ventilation und Brandschutz
- Steuerung für das automatische Regalbediengerät, VOLLERT
- 1 x 20-Fuß-Container mit zwei Ladegeräteeinheiten für Blei-Batteriesysteme, vorhandene Bauart, BENNING, korrespondiert mit den Ladeplätzen 11/12
- 1 x 20-Fuß-Container mit vier Ladegeräteeinheiten für Blei-Batteriesysteme, neuere Bauart, HAWKER, korrespondiert mit den Ladeplätzen 22/23/24/25
- 1 x 20-Fuß-Container mit drei Ladegeräteeinheiten für Blei-Batteriesysteme, neuere Bauart, HAWKER, korrespondiert mit den Ladeplätzen 13/14/15
- 1 x 20-Fuß-Container mit einer Ladegeräteeinheit für Lithium-Batteriesysteme, AKASOL, korrespondiert mit dem Ladeplatz 16
- 5 x containereigene Versorgung für Heizung, Ventilation und Brandschutz

Die Ladegeräteeinheiten wurden gemäß der in **Abbildung 40** dargestellten Skizze in die neuen Aufstellcontainer eingebaut. Mehrere Lüfter sorgen bei hohen Temperaturen dafür, dass die Abwärme der Ladegeräte abgeführt werden kann. Bei niedrigen Temperaturen und ausgeschalteten Ladegeräten kann über Heizungen sichergestellt werden, dass die Aufstellcontainer frostfrei gehalten werden. Zudem verfügen die Aufstellcontainer über Licht, übrige Steckdosen und einen Anschluss an die Brandmeldeanlage. Weiterhin verfügen die Ladegeräteeinheiten über eine Ethernet-Schnittstelle, die mit jeweils einem Ethernet-Switch pro Aufstellcontainer verbunden wurden. Über diese Schnittstelle können auch Batteriesysteminformationen der an den Ladegeräteeinheiten angeschlossenen Wechselbatterien ausgelesen werden. Auf diese Weise ist für eine Datenübermittlung zwischen den Ladegeräteeinheiten und dem Batterien-Verwaltungs-System gesorgt.

Damit die Batteriesysteminformationen vom Ladeplatz innerhalb der Leichtbauhalle durch die korrespondierende Ladegeräteeinheit außerhalb der Leichtbauhalle ausgelesen werden können, musste eine Datenleitung für

die Kommunikation mittels CAN-Bus zwischen den Ladegeräteeinheiten und den Multikupplungen an den Ladepätzen gezogen werden.

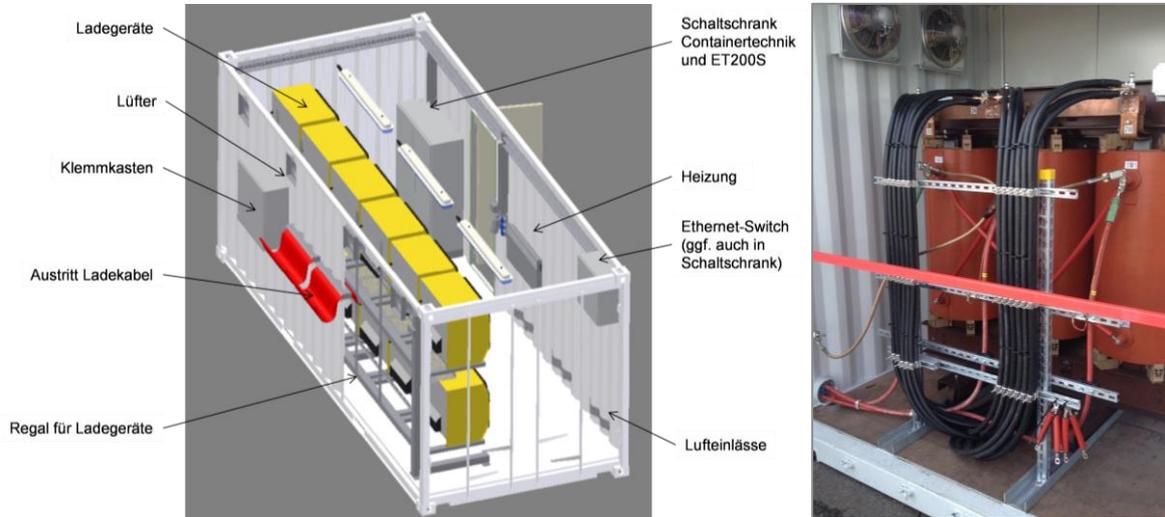


Abbildung 40: Aufbauskiizze von Aufstellcontainern mit Ladegeräteeinheiten; Einblick in d. Aufstellcontainer mit Transformatoreinheit

3.2.2 Installation Transformator- und Ladegeräteeinheiten

Da die Beschaffung der Wechselbatterien und Ladegeräteeinheiten für das Projekt BESIC von den Anforderungen der Praxisumgebung maßgeblich bestimmt wurde, musste im Vorfeld zunächst eine Spezifikation über die Ausführung der Batteriesysteme für die Wechselbatterien, der zugehörigen Ladegeräteeinheiten und der Verkabelung/Installation der Ladepätze in der Station erstellt werden. Da bei den Blei-Batteriesystemen normalerweise pro Batteriesystemmodul mit 80 V Nennspannung ein Ladegerät benötigt wird und somit der Installationsaufwand sehr groß gerät, wurden je drei von ihnen zu einem Ladegerätmodul zusammengefasst, wie sie in **Abbildung 41** zu sehen sind.



Abbildung 41: angelieferte Ladegerätmodule in Kompaktbauweise

Um den erhöhten Anforderungen an die Energieversorgung gerecht zu werden, wurde vom Terminalbetreiber eine Transformatoreinheit inklusive Unterverteilung in einem weiteren Aufstellcontainer untergebracht. In **Abbildung 41** sind die vorgefertigten Schaltschränke zu sehen, die für den Anschluss der Aufstellcontainer genutzt werden.

Für die neuen Ladepätze der Blei-Batteriesysteme wurden zusätzlich zu dem bereits vorhandenen Ladecontainer zwei neue Ladecontainer aufgebaut. Die insgesamt vier Aufstellcontainer wurden dann gegen Mitte des

Projekts wie in **Abbildung 42** angeordnet, um eine optimale Raumnutzung und kurze Kabelwege herüber zu den Ladeplätzen zu gewährleisten. Entsprechend der Anordnung musste für den Zugang zu den oberen Containern eine Treppenanlage installiert werden.

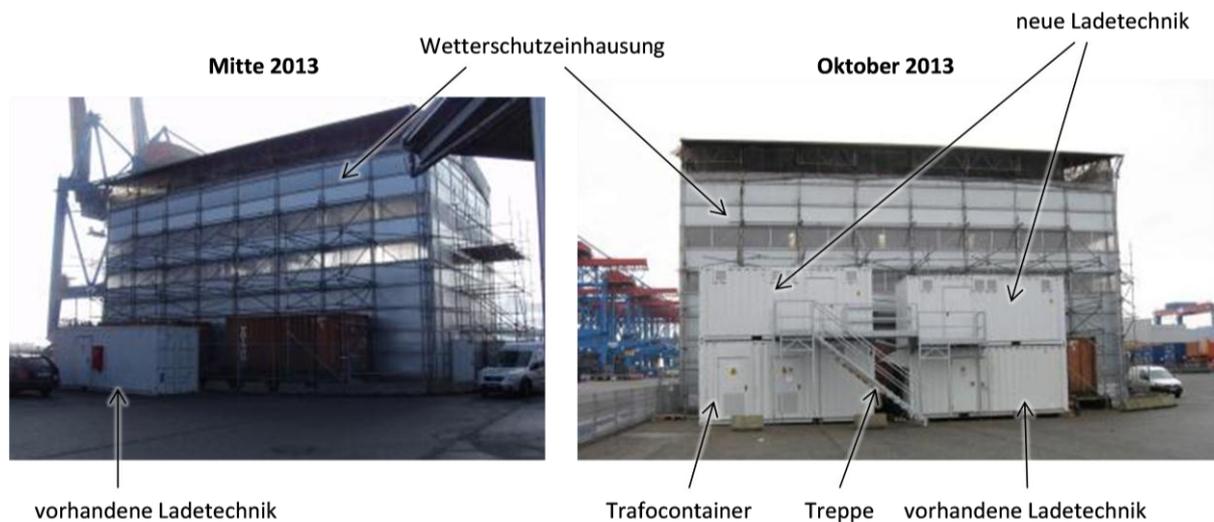


Abbildung 42: Erste Erweiterung der Ladeinfrastruktur um die Ladeplätze für Blei-Batteriesysteme

Wie in **Abbildung 43** zu sehen ist, wurden die aufgestellten Seecontainer aus statischen Gründen mit Gewichten (Gleisschotter in Big-Packs auf je einer 20-Fuß-Containerbasis) beschwert. Jeder Aufstellcontainer und darin eingerichteter elektrischer Betriebsraum ist über eine Treppe erreichbar. Gegen Ende des Projekts BESIC wurde ein Aufstellcontainer mit der Ladegeräteeinheit für die unten beschriebenen Lithium-Batteriesysteme auf dem linken Containerstapel errichtet.



Abbildung 43: Aufstellcontainer außerhalb der Leichtbauhalle (beschwert);

Die Ladeinfrastruktur für die Blei-Batteriesysteme wurde gegen Ende des ersten Projektjahres in Betrieb genommen und nach Anlieferung der ersten B-AGV auf dem Terminalgelände erfolgreich getestet und der Automatikbetrieb aufgenommen. Obwohl zu diesem Zeitpunkt noch nicht alle B-AGV in der Flotte mitfuhren, konnten seitdem Betriebsdaten aus der regulären Betriebsweise des Terminals aufgenommen und ausgewertet werden.

Die neue Anlagentechnik der Station und der B-AGVs erforderte eine Schulung der Service-Mitarbeiter auf dem Terminalgelände um die Entstörung, Wartung und Reparatur zu ermöglichen.

3.2.3 Übrige systemrelevante Anlagen

Ebenso wie die Fahrzeuge mit diesel-hydraulischem (H-AGV) oder diesel-elektrischem Antriebsstrang (E-AGV) sind auch die Fahrzeuge mit batterie-elektrischem Antriebsstrang (B-AGV) regelmäßig zu warten. Für die Wartungsarbeiten bei den B-AGV müssen die Fahrzeuge angehoben und die Wechselbatterien spannungsfrei geschaltet werden können. Da die Wechselbatterien auf Basis von Blei-Batteriesystemen im erheblichen Maße und auch die Wechselbatterien auf Basis von Lithium-Batteriesystemen im geringeren Maße ein Zusatzgewicht darstellen, waren die werkstatteigenen Hebevorrichtungen zu verstärken. In **Abbildung 44** ist eine neue Radgreiferanlage zu sehen, mit welcher die B-AGV trotz höheren Eigengewichts für Wartungszwecke angehoben und bewegt werden können.

Um darüber hinaus für eine reibungslose Durchführung der Feldtests garantieren zu können, werden die Wechselbatterien auf Basis von Blei-Batteriesystemen an sich regelmäßig von Service-Mitarbeitern gewartet. Bei der Batteriewartung wird regelmäßig die Elektrolytflüssigkeit („Batteriewasser“) nachgefüllt. Außerdem wird bedarfsweise die Oberfläche des Batteriesystemaufbaus innerhalb des Tragrahmens gereinigt. Bewährt hat sich in diesem Zusammenhang auch der Einsatz der in **Abbildung 44** gezeigten Batteriewasserentsalzungsanlage. Mit dieser lässt sich kostengünstig und zuverlässig Batteriewasser für alle vierzehn Wechselbatterien im Feldtest herstellen.



Abbildung 44: Mobile Radgreiferanlage und Batteriewasserentsalzungsanlage als Werkstattausrüstung für Batteriewartung

3.3 Durchführung von Flottenversuchen zum regulären Betrieb

Im Rahmen der Umrüstung der Fahrzeuge wurden solche Chassis hergenommen, die nicht mehr die Möglichkeit eines mittigen Transports von 20-Fuß-Containern ermöglichen, sondern ausschließlich außermittige Containerpositionierungen zulassen. Darum waren Anpassungen in der Logik der Terminalbetriebssoftware (Terminal Operating System, kurz TOS) sowie des AGV-Management-Systems (AGV-MS) notwendig. Als die ersten umgerüsteten Fahrzeuge in das Horizontaltransportareal eingeschleust worden waren, musste sich zeigen, ob die operativen Planungs- und Steuerungskomponenten korrekt arbeiteten.

In der Vorbereitung der Flottenversuche zur regulären Betriebsweise des Containerterminals musste das Regalager (wie in der **Abbildung 45** zu sehen) mit den zusätzlichen Wechselbatterien erstbestückt werden. Obwohl zunächst lediglich Wechselbatterien auf Basis von Blei-Batteriesystemen im Pool vorhanden gewesen waren, mussten Softwareanpassungen bezüglich der Batteriewechselvorgänge gemacht werden. Denn genau genommen setzt sich der Pool aus Wechselbatterien mit Blei-Batteriesystemen aus drei Bauserien zusammen (zwei prototypische Bauserien aus einem vorangegangenen Projekt und Batteriesysteme im BESIC-Projekt). Die bauliche Serie einer Wechselbatterie muss erkannt und bei der Auswahl eines Ladeplatzes bzw. Steuerung des Regalbediengeräts berücksichtigt werden; den Batteriesystem-Bauserien wird jeweils eine feste Gruppe von Ladeplätzen zugewiesen, an denen die geeigneten Ladegeräteeinheiten vorzufinden sind, um die entsprechenden Wechselbatterien sicher einlegen, kontaktieren und laden zu können.

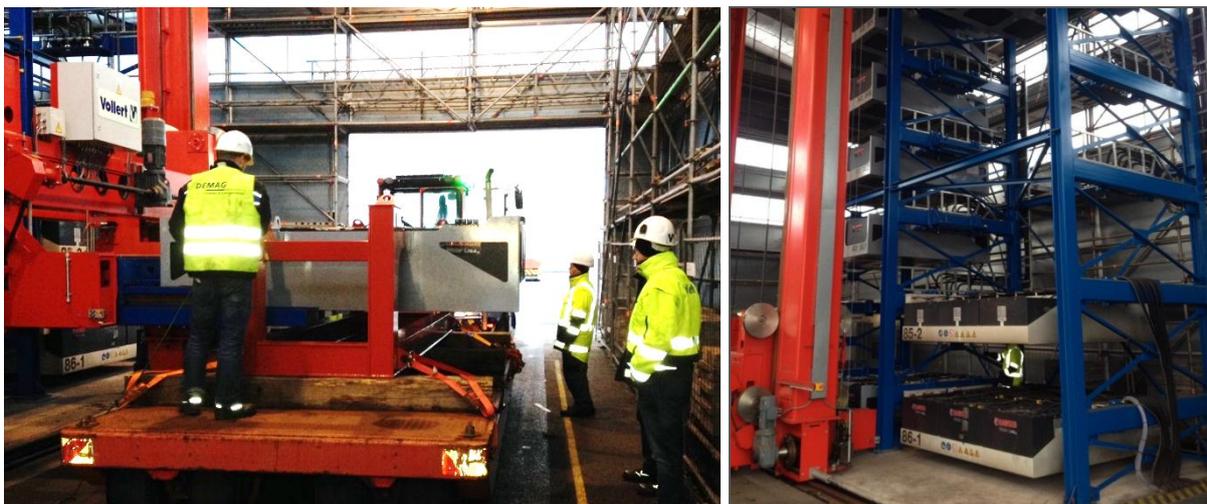


Abbildung 45: Erstbestückung des Batterielagers mit Wechselbatterien auf Basis von Blei-Batteriesystemen

In den anfänglichen Flottenversuchen waren die Auswirkungen des batterie-elektrischen Antriebs bei regulärer Betriebsweise im Horizontaltransportareal zu untersuchen gewesen. Dabei kann grundsätzlich zwischen der Fahrzeugebene und der Flotten- oder Systemebene unterschieden werden: Auswertungen auf Fahrzeugebene beziehen sich immer nur auf ein Fahrzeug an sich, also z. B. die mögliche Dauer des Fahrbetriebs mit einer vollen Batterieladung oder die durchschnittliche Leistung. Bei Betrachtungen auf Flotten- bzw. Systemebene werden immer alle Fahrzeuge oder Wechselbatterien im Verbund betrachtet bzw. die Batteriewechselstation als zentrales Element für die gesamte Flotte. So wurden beispielsweise die Anzahl der Batteriewechsel pro Tag erfasst und ausgewertet.

Als Datenbasis für die Auswertungen wurden unterschiedliche Quellen innerhalb des Systems herangezogen, hierzu gehören die Fahrzeugsteuerung, die Batterie-Controller, die Ladegeräteeinheiten, das Regalbediengerät oder die im Containerterminalbetrieb eingesetzten Strommessstellen. Zur Prüfung der Plausibilität wurden Da-

ten, die gleichzeitig in unterschiedlichen Systemen aufgezeichnet werden, untereinander abgeglichen. Auf der einen Seite wird durch den Batteriecontroller zur Beendigung eines Ladevorgangs festgehalten, wie viel Energie in die Wechselbatterie eingespeichert worden ist; durch die Energiemengenzähler in der Station kann zusammen mit den Bewegungsdaten des Regalbediengeräts auf der anderen Seite die Zählerstandsveränderung zwischen Ein- und Austritt einer Wechselbatterie ermittelt werden. Einerseits werden durch den Batteriecontroller die Start-/Endzeitpunkte sowie die Dauer des Ladens festgehalten. Andererseits werden durch das Regalbediengerät die Zeitpunkte für die Ein-/Auslagerung einer Wechselbatterie gespeichert.

Stellvertretend für die Vielzahl an Auswertungen von Betriebsdaten aus dem regulären Terminalbetrieb sollen zwei Kennzahlen kurz vorgestellt werden: Als Erstes die Auswertung der Ausnutzung der Batteriekapazität als technische Kennzahl auf Fahrzeugebene und als Zweites die Anzahl der Batteriewechsel pro Tag als logistische Kennzahl auf Systemebene.

Im Punktdiagramm in **Abbildung 46** sind die aus einer Wechselbatterie entnommenen Kapazitäten für den Monat September 2014 dargestellt. Auf etwa der Hälfte dieses Zeitraums erfolgte die Umstellung des Batterien-Verwaltungs-Systems (BVS) von Phase 2 auf Phase 3 wie unten beschrieben. In der Phase 2 wurde der Batterieladezustand alleine über die Batteriespannung ermittelt; dieses Verfahren ist relativ ungenau, da es vielen Störgrößen unterliegt. Mit Einführung der Phase 3 des BVS erfolgt die Bestimmung des Batterieladezustands über die installierten Batteriecontroller; zudem werden Batteriewechselvorgänge zentral für alle Fahrzeuge über das BVS ausgelöst. Es ist deutlich zu erkennen, dass in der Phase 3 die Entladung der Wechselbatterien deutlich gleichmäßiger ausfällt und nahe am derzeit eingestellten Zielwert von 60 % Entladetiefe (Depth of Discharge, kurz DOD) liegt.

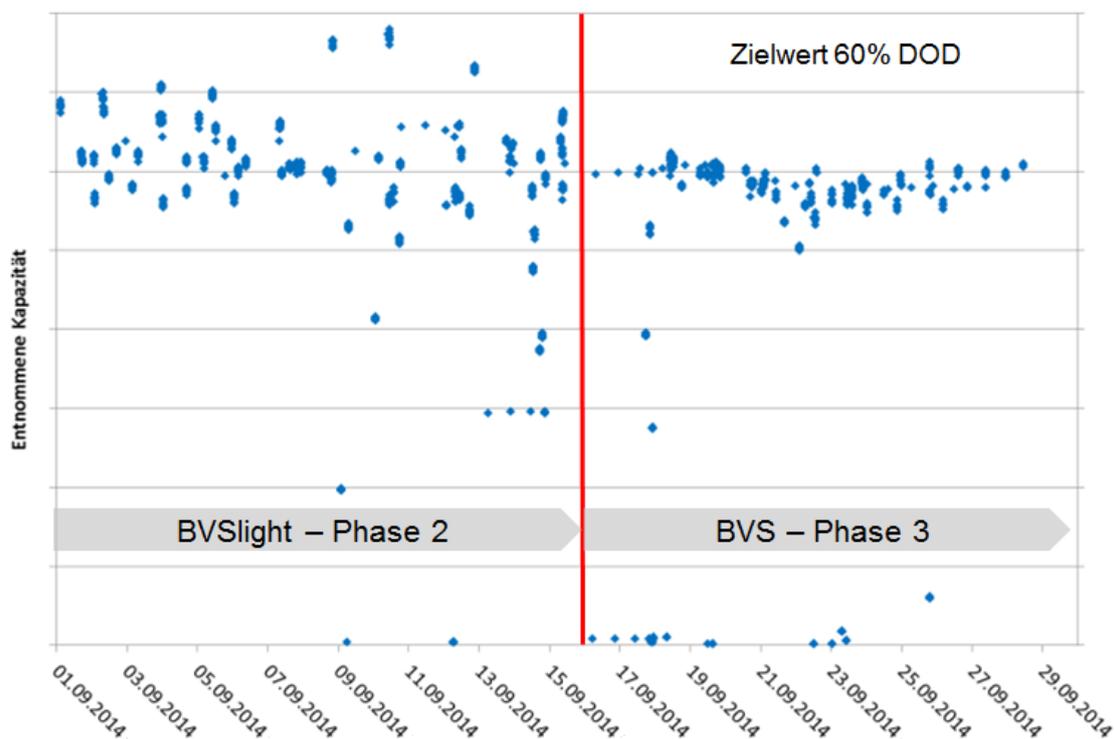


Abbildung 46: Auswertung zur Ausnutzung der Batteriekapazität

Für den Betrieb der Fahrzeugflotte bedeutet dies, dass die Entladevorgänge der Wechselbatterien gut überwacht werden können und dass im BVS jederzeit alle Batterieladezustände vorliegen. Diese zuverlässigen Daten bilden die Basis für die angestrebte Optimierung der Lade- und Batteriewechselvorgänge durch das BVS.

Die verbleibende leichte Streuung der entnommenen Kapazität hat zwei Gründe:

- Zum einen wird der Ladezustand durch das BVS in Abhängigkeit von der Temperatur eingeschätzt. Bei niedriger Temperatur ist einem Blei-Batteriesystem eine geringere Ladungsmenge zu entnehmen als bei Normaltemperatur. Bei niedriger Außentemperatur kühlt eine Wechselbatterie beim Fahrbetrieb ab, nachdem es an Bord eines Fahrzeugs die Station verlassen hat. Somit sinkt der Schätzwert über den Ladezustand verstärkt und der Schwellwert für den Batteriewechsel wird eher erreicht.
- Zum zweiten beendet das Fahrzeug stets den aktuellen Transportvorgang, bevor es zum Batteriewechsel fährt. Aufgrund der unterschiedlichen Strecken, die dabei zurückgelegt werden, kann eine weitere Streuung entstehen, die sich auf den praktischen Einsatz jedoch kaum merklich auswirkt.

Bei der Steuerung des Regalbediengeräts wird die Vornahme eines Batteriewechsels in der Station protokolliert. Auf Grundlage solcher Aufzeichnungen kann beim BVS rückblickend ermittelt werden, wie viele Batteriewechsel an einem jeweiligen Kalendertag durchgeführt wurden. Die **Abbildung 47** zeigt ein Balkendiagramm mit der Anzahl der vorgenommenen Batteriewechsel ziemlich zu Beginn der Feldtests. Obwohl bis dato bloß eine Wechselposition angelegt worden ist, ist die Wechselkapazität in der Station doch so hoch, dass sie von einem Anteil von zehn B-AGV in der Flotte nicht ausgeschöpft werden kann. Grob gefasst finden an einem Tag zwischen sechs und vierzehn Batteriewechsel statt. Überschlüssig lässt sich damit aussagen, dass jedes B-AGV pro Tag etwa einen Batteriewechsel erfährt. Im Balkendiagramm sind drei Tage auszumachen, an denen überhaupt keine Batteriewechsel stattgefunden haben. Dies sind die sogenannten Hafengefeiertage: Ostersonntag, der Tag der Arbeit und Pfingstsonntag.

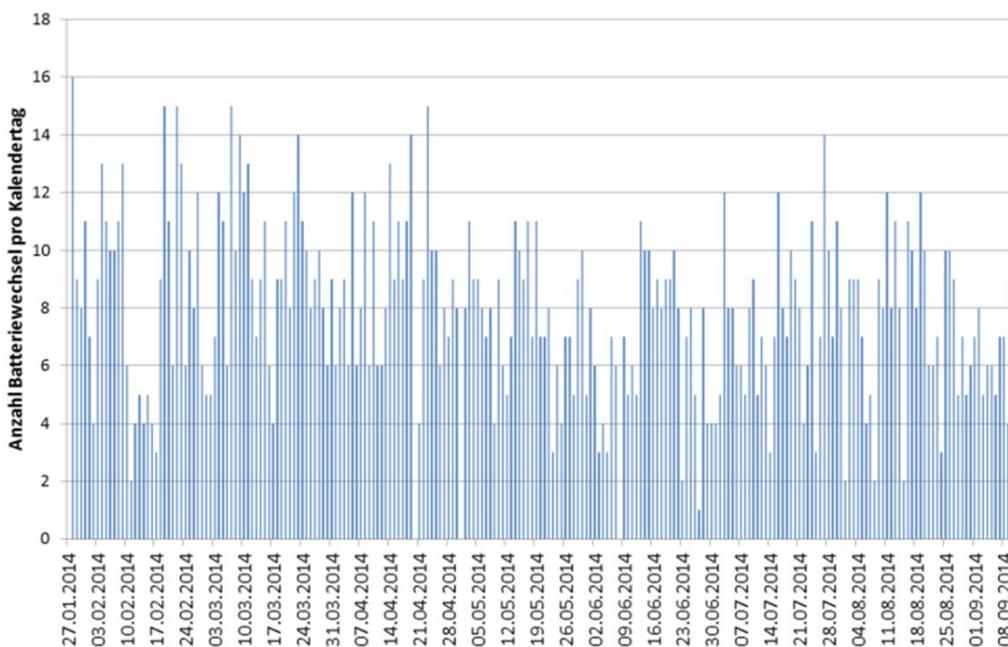


Abbildung 47: Auswertung Batteriewechsel pro Tag während der Flottenversuche zur regulären Betriebsweise des Containerterminals

In einer weiteren Flottenversuchsreihe wurden die Durchschnittsleistungen während des Teilzyklus des Entladens analysiert. Hierbei wird die aus den Batteriesystemen entnommene Energie durch die Einsatzdauer dividiert. Als maximale Durchschnittsleistung während des Entladezyklus konnte ein Wert von 15 kW ermittelt werden. In diesem Fall wird das AGV durchgehend im vollen Betrieb unterwegs gewesen sein und nur kurzzeitig betriebsbedingte Pausen unter den Kai Kränen sowie im Lagerbereich eingelegt haben. Solche hohen Durchschnittsleistungen treten im Alltagsbetrieb aber nur selten auf. Vielmehr konnte ein Mittelwert von etwa 7,5 kW für die Durchschnittsleistung pro Entladeteilzyklus festgestellt werden.

Als weitere Größen wurden die Verweildauern der Wechselbatterien in der Station sowie die Dauer der Ladeprozesse aufgezeichnet. Es zeigt sich mit Blick auf das Punktdiagramm in **Abbildung 48**, dass die Wechselbatterien zwischen fünf und sechs Stunden geladen werden. Selten werden die Wechselbatterien nach dem Aufladen wieder direkt entnommen und in ein AGV gesetzt. Im Durchschnitt verbleiben die Wechselbatterien ca. 20 Stunden in der Station, bis sie wieder von einem AGV aufgenommen werden. Oftmals halten sich Wechselbatterien deutlich länger in der Station auf. Dies weist auch darauf hin, dass die Grenzen der Lade- und Batteriewechselkapazität der Station unter der gegenwärtigen Ausstattung des Containerterminals noch nicht erreicht ist. Es dürften mit der vorhandenen Anzahl von Wechselbatterien im Pool deutlich mehr AGVs als jetzt im Feldtest betrieben werden können. Gleichzeitig bedeutet dies aber auch, dass eine hohe Flexibilität der Anlage für den Strombezug und die Vermarktung von Zu- und Abschaltpotential zur Verfügung steht.

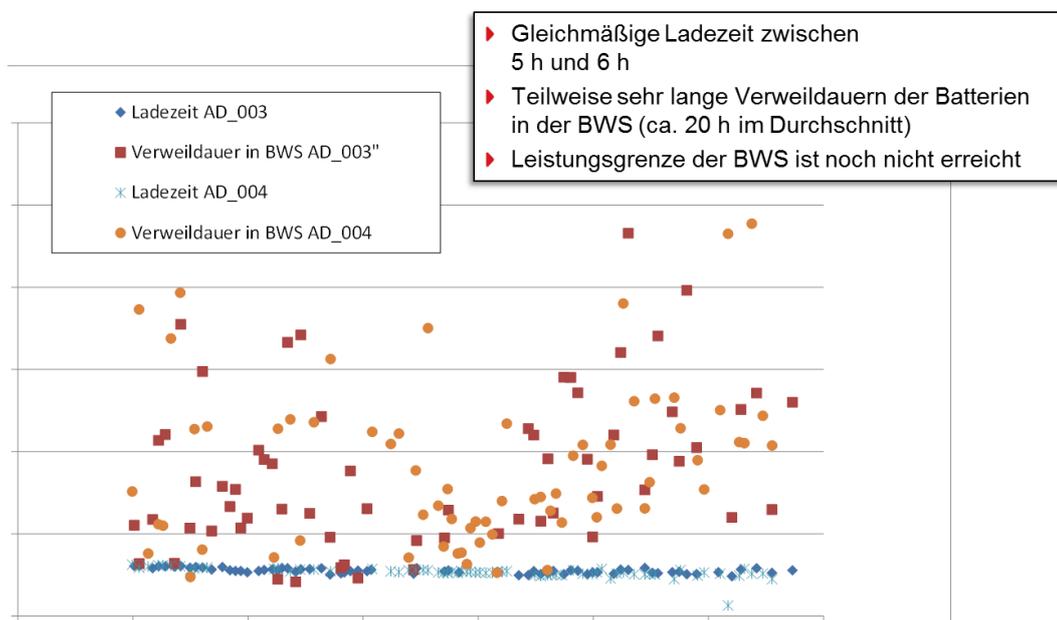


Abbildung 48: Ladezeiten und Verweildauern der Blei-Säure-Batterien in der BWS

Anfangs waren die Auswertungen zumeist händisch mit Hilfe einer Tabellenkalkulation durchgeführt worden, später konnten die entsprechenden Betriebs- und Energiedaten automatisch durch das BVS erfasst und die definierten Kennzahlen fortlaufend aktualisiert werden.

In der Tabelle 9 werden einige Kennzahlen aus den Flottenversuchen zur regulären Betriebsweise des Containerterminals aufgeführt. Im BESIC-Projekt wurde eine Entladetiefe von 60 bis 65 % umgesetzt. Sofern eine größere

Entladetiefe umgesetzt wird, werden sich die Einsatzzeiten der B-AGV mit einer Batterieladung weiter verlängern und dadurch die Anzahl der Batteriewechsel pro Tag verringern.

Tabelle 9: Kennzahlen aus Flottenversuchen zur regulären Betriebsweise des Containerterminals

Kennzahl	Datenquelle	Wertebereich
Betriebsstunden pro Fahrzeug und Tag	Fahrzeug-SPS	10..12 Bh / Tag
Fahranteil (Fahren / Betriebsstunde)	Fahrzeug-SPS	ca. 44 %
Einsatzdauer pro Batterieladung	Regalbediengerät	24..30 h
Ausnutzung der Batteriekapazität	Batterie-Controller	60..65 %
Energie pro Betriebsstunde (aus Batterie)	Regalbediengerät + Batterie-Controller	ca. 14 kWh
Ladedauer (abhängig von Entladetiefe)	Batterie-Controller	5..6 h
Anzahl Batteriewechsel pro Tag	Regalbediengerät	8..10 h

Alle oben vorgestellten Ergebnisse stammen aus dem regulären, vollautomatisierten Terminalbetrieb.

Um die unterschiedliche Einflussgrößen auf das System beurteilen zu können, sollten ausgewählte Randbedingungen bzw. Systemparameter manuell verändert und deren Auswirkung auf den Betrieb beurteilt werden. Dazu wurden zunächst zusammen mit dem Containerterminalbetrieb die folgenden speziellen Szenarien abgestimmt, bei denen Systemparameter variiert worden sind:

- Reduzierung der Anzahl verfügbarer Wechselbatterien und zugehöriger Ladeplätze in der Batteriewechselstation
- Veränderung des Verhältnisses von zwischen Wechselbatterien und zugehörigen Ladeplätzen (z. B. gleiche Anzahl Batterien, weniger aktive Ladegeräteeinheiten)
- Erhöhung der Auslastung der Wechselposition in der Station durch Verringerung der Kapazitätsausnutzung bei den Wechselbatterien; dies entspricht der „Simulation“ einer größeren Fahrzeuganzahl für den Wechselprozess.

Bei der Auswahl der speziellen Szenarien wurde auch deren Umsetzbarkeit, das heißt die zu erwartenden Einschränkungen des Produktivsystems, geprüft. Da die Untersuchungen im regulären Terminalbetrieb durchgeführt wurden, musste immer darauf geachtet werden, dass die Betriebsabläufe möglichst nicht gestört werden. Aus diesem Grund mussten mehrwöchige Änderungen an den Systemparametern des untersuchten AGV-Systems immer mit dem Containerterminalbetreiber abgestimmt werden. So wurde beispielsweise gegen Ende des ersten Projektjahres zuerst das Szenarium eingestellt, dass sieben B-AGV mit zwölf Wechselbatterien auf Basis von Blei-Batteriesystemen und sechs zugehörigen Ladeplätzen betrieben werden sollten. Leider kam es auch vor, dass eine solche Einstellung zu den Systemparametern durch nicht planbare Teilausfälle in der Fahrzeugflotte zu Nichte gemacht wurde.

Um das Verhalten der B-AGVs in den einzelnen Phasen des Feldtests bewerten zu können, wurden bald nach dem Einschleusen der zusätzlichen Versuchsfahrzeuge diverse Referenzwerte wie zum Beispiel der Strombedarf der Flotte und der Fahranteil einzelner AGVs bestimmt. Wie bereits oben angeklungen, wurden im Zuge der Erweiterung der Ladeinfrastruktur Messstellen eingerichtet, mit denen die eingespeicherten Batterieladungs-

mengen, die Verbrauchsmengen in der Station sowie die Strombedarfe des Anteils von B-AGVs in der Flotte analysiert werden konnte. In der Abbildung 49 sind die zusammengerechneten Strombedarfswerte der Monate im Anfangszeitraum der Feldtests in einem Balkendiagramm zu sehen.

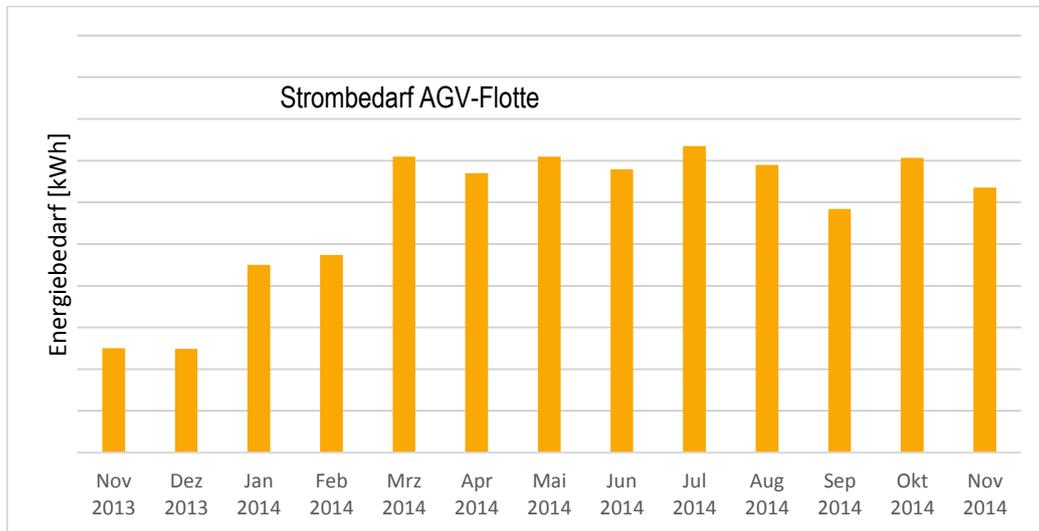


Abbildung 49: Strombedarf für den B-AGV-Anteil in den Anfangsmonaten des Feldtests

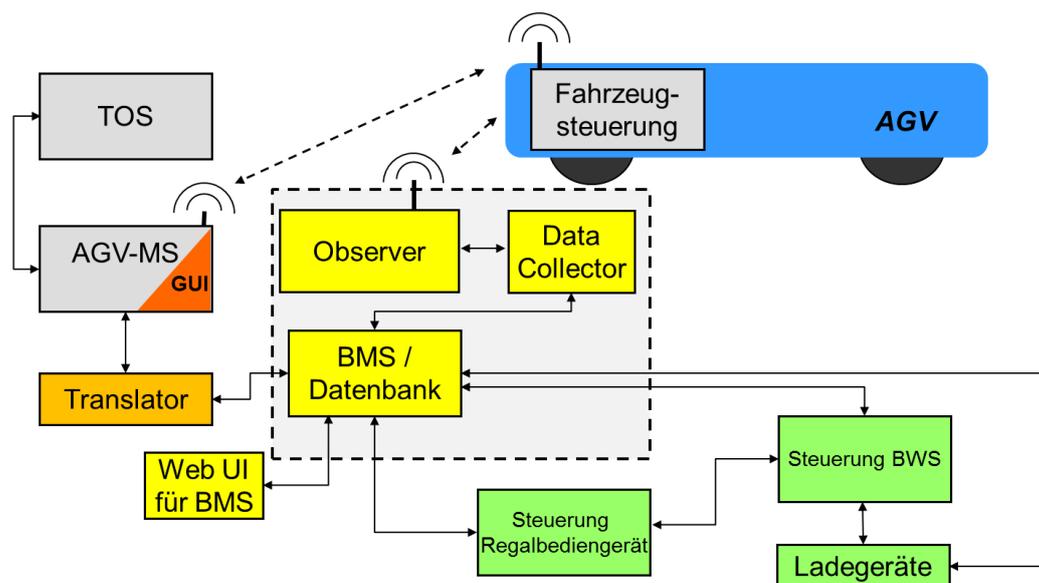
Aufgrund der geringen Anzahl von B-AGV innerhalb der Fahrzeugflotte und der Schwankungen in der Auslastung des Terminals waren die Flottenversuche hinsichtlich bestimmter Systemparameter sorgsam auszuwerten gewesen. Es war von besonderer Bedeutung gewesen, die Fahranteile der B-AGV festzuhalten und die Betriebs- und Energiedaten somit den spezifischen Szenarien zuordnen zu können. Nach Umsetzung entsprechender Überwachungs- und Analysefunktionalitäten im Batterien-Verwaltungs-System (BVS) waren bessere Auswertungsmöglichkeiten gegeben, weil die Betriebsszenarien teils automatisiert festgestellt/erkannt werden konnten.

3.4 Entwicklung eines Batterien-Verwaltungs-Systems (BVS)

Das Batterien-Verwaltungs-System (BVS) bildet einen zentralen Baustein der IKT-Lösung für den Betrieb batterieelektrischer Fahrzeuge in einem geschlossenen Transportsystem. Zu seinen Aufgaben zählen die Überwachung aller im AGV-System befindlichen Wechselbatterien sowie die intelligente Steuerung von Lade- und Batterie-wechselvorgängen.

Vor dem Projekt BESIC waren die Meldungen über den Batterieladezustand aus der Fahrzeugsteuerung heraus erfolgt; die Batteriewechselvorgänge waren von der Steuerung des Regalbediengeräts mit übernommen worden. Die beiden Prototypenfahrzeuge waren seit je her mit jeweils zwei fest zugeordneten Wechselbatterien betrieben, so dass keine Auswahlstrategien erforderlich gewesen waren. Durch Hinzunahme weiterer Versuchsfahrzeuge und Wechselbatterien unterschiedlichen Batterietyps offenbarten sich viele Möglichkeiten für eine betriebliche Optimierung. Dazu war es als notwendig erachtet worden, übergeordnet zum Management der Fahrzeugflotte und dem Management der Batteriewechselstation für eine ganzheitliche Überwachung und Steuerung des B-AGV-Systems zu sorgen.

Das BVS muss in die vorhandene Softwarestruktur des Containerterminals eingebunden werden, damit alle Informationen empfangen und weitergegeben werden können. Da diese durchaus komplex ist und eine Vielzahl von Schnittstellen vorliegt, war entschieden worden, das BVS schrittweise einzuführen.



Wie durch die Zweiteilung in Abbildung 50 hervorgehoben ist, wird zwischen einem BVS „ohne Intelligenz“ und einem „intelligenten“ BVS unterschieden. Das BVS „ohne Intelligenz“ bildet alle Grundfunktionen ab, die für den automatisierten Betrieb der Fahrzeuge und der Batteriewechsel- und Ladevorgänge erforderlich sind. Das „intelligente“ BVS soll darüber hinaus unterschiedliche Optimierungsfunktionalitäten unterstützen, mit denen die Netzverträglichkeit des Containerterminalbetriebs und die Nutzung regenerativer Energien erhöht und dabei gleichzeitig die Transportleistung des B-AGV-Systems aufrecht erhalten oder gar verbessert werden kann.

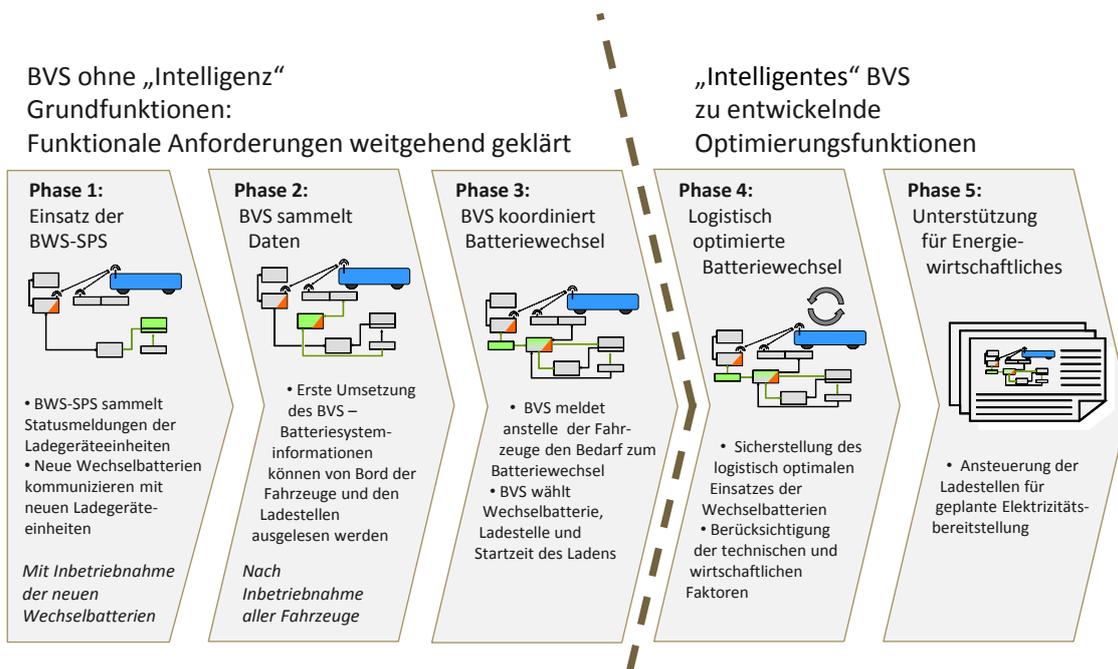


Abbildung 50: Phasen der Einführung des Batterien-Verwaltungs-System (BVS)

Die Einführung des BVS „ohne Intelligenz“ ist in drei Phasen erfolgt:

- Im Rahmen der Erweiterung der Ladeinfrastruktur wurde eine zusätzliche Feldgerätesteuerung in der Station (sogenannte BWS-SPS) installiert. Dessen Aufgabe hat in der Phase 1 darin bestanden, den Status der angebotenen Ladegeräteeinheiten zu erfassen, auszuwerten und weiterzuleiten. Der Status wird mit Hilfe von drei Signalstromkreisen (potenzialfreie Kontakte für „lädt / lädt nicht“, „Ladevorgang beendet / laufender Ladevorgang“ und „gestört / bereit“) angezeigt. Er muss für alle Ladegeräteeinheiten bekannt sein, damit die Batteriewechselvorgänge ordnungsgemäß durchgeführt werden können. Die Planung der Batteriewechsel erfolgt in dieser ersten Phase weiterhin über die Steuerung des Regalbediengeräts. Der Einsatz der Wechselbatterien erfolgt über ein einfaches FIFO-Prinzip („first-in-first-out“). Des Weiteren kommunizieren die neuen Batterien über die Batteriecontroller bereits mit den Ladegeräten, so dass die Ladevorgänge z.B. aufgrund niedriger Elektrolyttemperaturen dynamisch angepasst werden.
- In der Phase 2 wird das BVS als eine zentrale Softwareanwendung eingeführt. Es hat zunächst die Batteriesysteminformationen sämtlicher Wechselbatterien und die Statusinformationen der Ladegeräteeinheiten entgegen genommen und persistent gehalten. Zu den Batteriesysteminformationen gehören etwa der Ladezustand und die Batteriesystemtemperatur einer Wechselbatterie, aber auch die Gesamtzahl der bisher absolvierten Lade-/Entladezyklen. Der Bedarf für einen Batteriewechsel wurde in der Phase 2 weiterhin durch die lokale Fahrzeugsteuerung selbst festgestellt und zu gegebener Zeit ein Batteriewechselvorgang ausgelöst. Wird eine Wechselbatterie an einem Ladeplatz eingegeben, so wird unmittelbar durch die BWS-SPS ein Ladevorgang selbsttätig initiiert.
- In der anschließenden Phase 3 konnte das BVS dann den Bedarf für Batteriewechsel aktiv überwachen und Batteriewechselvorgänge anordnen. Dazu wurde ein Translator zwischen BVS und der AGV-Flottensteuerung eingeführt. Bei der Anordnung eines Batteriewechsels ist die Batteriesystemtemperatur bei der Einschätzung des Ladezustands mit in Betracht gezogen worden.

Danach ist in zwei Phasen die Zusatzfunktionalitäten eines „intelligenten“ BVS bezüglich der operativen Überwachung und Steuerung der Elektrizitätsbereitstellung an die Fahrzeuge geschaffen worden:

- Um gleichzeitig auftretenden Bedarf für Batteriewechsel zu reduzieren, konnte das BVS ab der Phase 4 eine logistische Optimierung vornehmen. Es ist analysiert worden, wie lange einzelne AGV nach mit temperaturabhängiger Einschätzung des Ladezustands noch im Fahrbetrieb unterwegs sein können. Mit dieser Vorausschau sollte die Verfügbarkeit frisch geladener Wechselbatterien in der Station auf den anstehenden Bedarf für Batteriewechsel abgestimmt werden.
- Ab der Phase 5 konnte das BVS zudem noch etwas stärker energiewirtschaftliche Belange unterstützen. Die Ladezustandswerte für die Wechselbatterien und die Leistungsaufnahmewerte für die Ladeplätze sind wichtige Zustandsinformationen bei der Ausführung eines energiewirtschaftlichen Ablaufplans. Ein energiewirtschaftlicher Ablaufplan wird zur Beteiligung am Minutenreservemarkt und für eine Reduktion der Strombezugskosten Tags voraus erstellt. Im Laufe des Tages muss dieser fortlaufend darauf abgeprüft werden, ob die Ladezustandsentwicklung zutreffend vorhergesehen worden ist und ob die vorangekündigte Lastgangkurve des Containerterminals eingehalten werden kann. Des Weiteren konnte das BVS die Wünsche für das An-/Ausschalten von Ladeprozessen verarbeiten, welche im Bedarfsfall zur Aktivierung/Deaktivierung einer Regelenergieerbringung durch das Energie-Management-System gestellt werden.

3.5 Durchführung von Flottenversuchen mit logistischer Optimierung

Bei der logistischen Optimierung werden die Zeitpunkte für die Vornahme eines Batteriewechsels und des hochrechenbaren Bedarfs zur Abgabe der an Bord befindlichen Wechselbatterie und Aufnahme einer frisch geladenen einer Wechselbatterie optimiert.

Es können dabei folgende vier Ziele verfolgt werden:

- Es darf kein AGV mit leerer Batterie stehen bleiben.
Hieraus folgt, dass stets genug geladene Wechselbatterien zur Verfügung stehen müssen.
- Beim Batteriewechsel sollen keine Wartezeiten entstehen.
Daher sollten die Batteriewechsel zeitlich entzerrt werden.
- Die Batteriekapazität sollte möglichst gut ausgenutzt werden.
In Folge dessen ist die Anzahl der Batteriewechsel möglichst gering zu halten.
- Die Lebensdauer der Batterien sollte nicht beeinträchtigt werden.
Aus diesem Grund sind die Betriebszustände und die Wartung der Batterien zu berücksichtigen.

Batteriewechsel können unter anderem logistisch optimiert werden, indem ein AGV vorzeitig zur BWS gesandt wird. Dann nämlich ist die Wechselbatterie bereits vorzeitig wieder vollgeladen und steht rechtzeitig zum Zeitpunkt eines prognostizierten Engpasses für die Einwechslung in ein AGV zur Verfügung.

Von den oben genannten vier Zielen hat das erstgenannte Ziel die größte Bedeutung hinsichtlich eines reibungs-frei ablaufenden Betriebs. Da die Ladedauer der Batterien kürzer ist als die Betriebsdauer eines AGV mit einer Batterieladung, sind in der BWS weniger Wechselbatterien vorhanden als Wechselbatterien in den AGV. Es kann nun vorkommen, dass viele AGV einen ähnlichen Ladezustand aufweisen. Wenn sich dann auch noch ein ähnlicher Verbrauch bei den AGV einstellt, würde viele Fahrzeuge kurz hintereinander die BWS zum Batteriewechsel anfahren. Dies würde dazu führen, dass für die späteren AGV keine geladene Wechselbatterie mehr zur Verfügung steht und diese Fahrzeuge auf eine geladene Wechselbatterie warten müssen.

3.5.1 Umsetzung der logistischen Optimierung im BVS

Im BVS wurde die Erreichung des oben beschriebenen Hauptziels programmtechnisch wie im Beispiel beschrieben umgesetzt. Hierbei werden folgende Parameter berücksichtigt:

- „Anzahl AGVs“: Bei der Anzahl der AGVs werden nur die aktiven B-AGVs des Typs „BESIC mit Blei-Wechselbatterien“ berücksichtigt. Fahrzeuge, die beispielsweise ausgeschleust sind und daher dem System nicht zur Verfügung stehen, werden nicht berücksichtigt. Durch Einschleusen oder Ausschleusen ändert sich die Anzahl der verfügbaren AGVs.
- „Anzahl Wechselbatterien“: Bei der Anzahl der verfügbaren Wechselbatterien handelt es sich um das Minimum aus Wechselbatterien und Ladeplätzen. „Verfügbar“ heißt in diesem Fall, dass die Batterien bzw. die Ladeplätze aktiv sind. Die Anzahl kann variieren, wenn beispielsweise eine Batterie zu Wartungszwecken gesperrt wird oder ein Ladeplatz mit einer Störung ausfällt oder abgeschaltet ist. Berücksichtigt werden hier die in der BWS befindlichen Batterien.

- „Gesamtladedauer“: Dieser Wert wurde im BVS als konstante Ladedauer aller Wechselbatterien hinterlegt und wird hier vereinfacht als unabhängig vom SOC betrachtet, mit dem der Ladevorgang begonnen worden ist. Beim Wert „Gesamtladedauer“ wird die Summe aus der eigentlichen Ladezeit und der anschließenden Cooldownzeit betrachtet. In der hierfür hinterlegten Zeitdauer senkt sich die Batteriespannung auf einen für den Fahrbetrieb zulässigen Wert ab. Die Annahme, dass die Gesamtladedauer konstant ist, spiegelt in sehr guter Näherung die Realität wieder, da in fast allen Fällen eine sehr ähnliche SOC-Spanne genutzt wird und sich somit beim Wiederaufladen eine sehr ähnliche Gesamtladedauer einstellt.
- „Verbrauch“: Hier wird ein Wert zu Grunde gelegt, der einer sehr hohen Terminalauslastung entspricht, wodurch die Batterien schnell entladen werden und häufig Batteriewechsel durchgeführt werden müssen.
- Neben dem Verbrauch wird der aktuell vorhandene „temperaturkompensierte SOC“ genutzt, der im BVS für jede Batterie vorliegt.
- „Resteinsatzzeit“: Die Resteinsatzzeit eines AGVs bis zu einem Batteriewechsel bzw. der in diesem befindlichen Batterie wird aus dem Verbrauch und dem temperaturkompensierten aktuellen SOC bestimmt.

Das im BVS hinterlegte Programm berechnet die Anzahl derjenigen AGVs, deren Resteinsatzzeit kleiner ist als die im System hinterlegte Gesamtladedauer der Wechselbatterien. Ist die Anzahl der Wechselbatterien bzw. verfügbaren Ladeplätze größer oder gleich der Anzahl der AGVs, die in der betrachteten Zeitspanne einen Batteriewechsel durchführen möchten, so ist kein Eingriff notwendig. Ist die Anzahl dieser AGVs jedoch größer, so wird ein logistischer Engpass prognostiziert und ein Batteriewechsel vorgezogen. In diesem Falle wird der Batteriestatus desjenigen AGVs, das den geringsten temperaturkompensierten SOC aufweist, im BVS von „grün“ auf „gelb“ gesetzt. Dies führt dazu, dass dieses AGV vorzeitig beim AGV-MS einen Batteriewechsel anfragt und somit zu diesem in die BWS fährt.

3.5.2 Häufigkeit Batteriewechsel

In der Vorbereitung auf die Flottenversuche mit logistischer Optimierung wurden für drei repräsentative Wechselbatterien auf Basis von Blei-Batteriesystemen Langzeitbeobachtungen hinsichtlich der Einsatzdauer einer Wechselbatterie im AGV durchgeführt. Über einen Beobachtungszeitraum von etwas mehr als einem halben Jahr stellte sich heraus, dass zwischen der Aufnahme einer Wechselbatterie und dessen späterer Abgabe durch ein AGV minimal etwas über 10 Stunden und maximal rund 40 Stunden gelegen haben. Wie in dem Punktdiagramm in **Abbildung 51** zu erkennen ist, liegt die Einsatzdauer nur wenige Male unterhalb von 13 Stunden. Dieser Wert entspricht dem in BVS bei der logistischen Optimierung hinterlegten „Verbrauch“. Als durchschnittliche Einsatzdauer konnte ein Wert von rund 26 Stunden ermittelt werden.

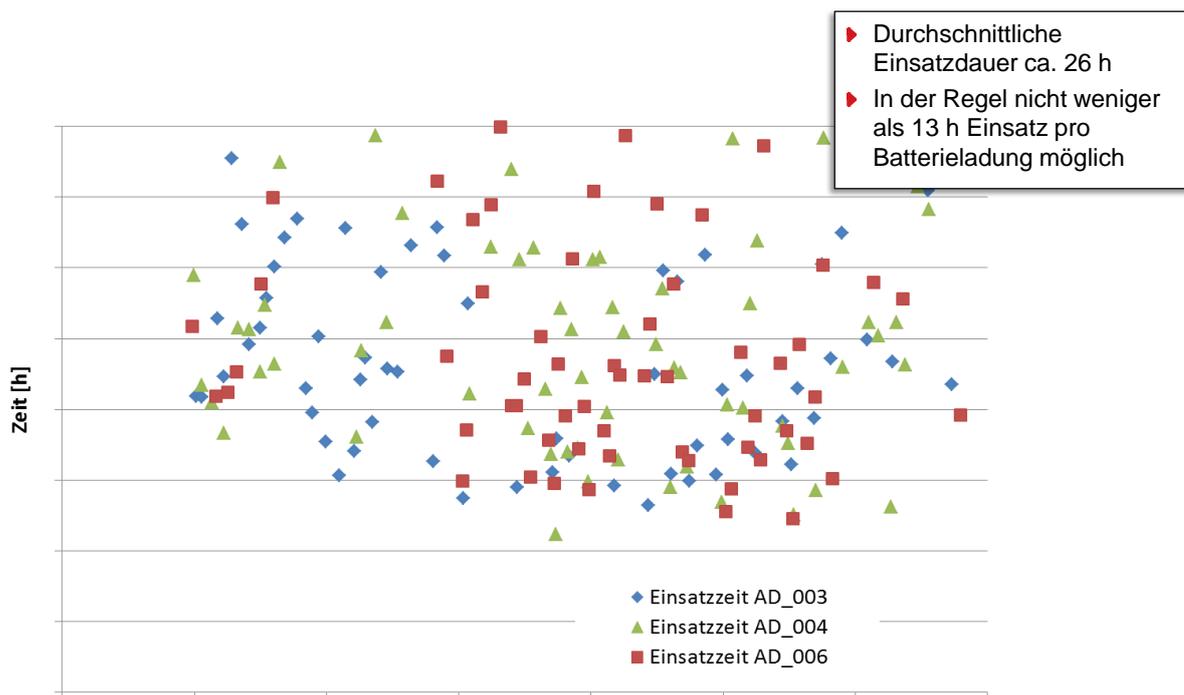


Abbildung 51: Einsatzzeiten von drei ausgewählten Blei-Säure-Batterien im Fahrzeug zwischen den Batteriewechseln

Weiterhin wurde analysiert, inwieweit die Kapazität der Wechselbatterien auf Basis von Blei-Batteriesystemen ausgenutzt wird. Die Langzeitbetrachtung bestätigt, dass die Batteriewechsel in der Regel bei einem Ladezustand von etwa 40 % stattfinden. Dieser Wert ist als Schwellwert hinterlegt, bei dessen Unterschreitung die AGVs von der Flottensteuerung (AGV-MS) mit einem Batteriewechsel beauftragt werden. Zugleich werden die Blei-Batteriesysteme durch die Festlegung eines solchen Schwellwerts vor einer Tiefenentladung geschützt, zu der es beim Unterschreiten eines Ladezustands von 20 % kommen würde. Die Ladungsmenge, die zwischen 40 % und 20 % des Ladezustands zugreifbar ist, steht als Reserve zur Verfügung, damit im Betrieb stets Fahrten zur Batteriewechselstation möglich sind.

Mit den Aufzeichnungen aus der Vorbereitung der Flottenversuche mit logistischer Optimierung ergibt sich das Punktdiagramm in **Abbildung 52**. Darin ist zum einen ersichtlich, dass der Schwellwert von 40 % des Ladezustands nicht wesentlich unterschritten wird. In aller Regel muss demnach für die Beendigung des laufenden Transportauftrags und die anschließende Zufahrt zur Batteriewechselstation eine geringe Ladungsmenge zugegriffen werden. Eine größere Entladetiefe würde die Einsatzdauer der Fahrzeuge erhöhen und die Anzahl der Batteriewechsel damit weiter reduzieren. Es wäre sogar noch eine Steigerung der Kapazitätsausnutzung möglich, ohne dass die Betriebsspannung der Batteriesysteme zu weit absinken würde. Zum anderen zeigt sich, dass die Kapazität der Batteriesysteme bei gewöhnlicher Betriebsweise im Containerterminal recht gleichmäßig ausgenutzt wird.

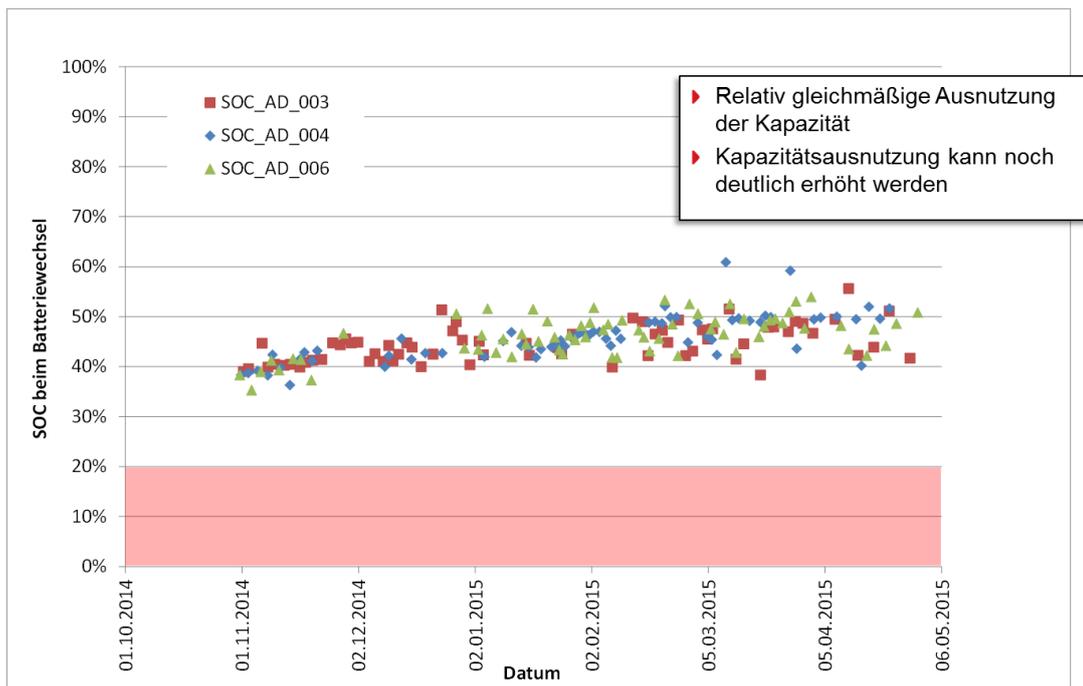


Abbildung 52: Kapazitätsausnutzung bei Blei-Säure-Batterien

Eine weitere Langzeitbetrachtung betrifft auch die Anzahl der Batteriewechsel pro Kalendertag bzw. für einen längeren Betrachtungszeitraum von Januar bis Mai 2015. In diesem Zeitraum wurden von den neun AGV mit Blei-Batteriesystemen insgesamt 1.031 Batteriewechsel durchgeführt. Die im Rahmen des BESIC-Projekts aufgebauten sieben Fahrzeuge und ihre auf Blei-Batteriesystemen basierenden Wechselbatterien hatten hieran einen Anteil von 729 Batteriewechseln.

In einigen Fällen wurden im regulären Betrieb zehn Batteriewechsel am Tag durchgeführt, im Durchschnitt waren es 8,2 Batteriewechsel pro Tag für alle batterie-betriebenen AGV zusammen. Hochgerechnet auf das Jahr 2015 ergeben sich im regulären Betrieb ca. 3.000 Batteriewechsel.

3.5.3 Berechnungen für logistische Optimierung

Als Ergänzung zu den speziellen Flottenversuchsreihen sollen die Auswirkungen einzelner Systemparameter auf das B-AGV-System in einem Berechnungsmodell untersucht werden. Es wurde mit einer Tabellenkalkulation ein zeitfortschreibendes Modell erstellt, in welchem Erfahrungswerte aus dem Feldtest zum Tragen kommen. Beispielsweise wird für den Strombedarf der Fahrzeuge mit dem oben ermittelten Wert für die Durchschnittsleistung im Teilzyklus des Entladens gerechnet. Mit Hilfe des Berechnungsmodells sollten unter anderem Strategien für die Bestimmung günstiger Batteriewechselzeitpunkte und der Zeitpunkte für den Start der Ladevorgänge ausgearbeitet und überprüft werden.

In **Abbildung 53** ist zu sehen, wie die Zustände der Wechselbatterien in der Station und an Bord der Fahrzeuge im zeitlichen Verlauf wiedergegeben werden. In diesem Simulationstool werden die Anzahl der AGVs und die Anzahl der vorhandenen Wechselbatterien, der durchschnittliche Verbrauch der Batterien in den AGVs bei maximaler Auslastung, die Ladedauer für die Wechselbatterien in der Station sowie die Batteriekapazität als Systemparameter hinterlegt. Als weitere Randbedingung werden anhand einer Batterieampel die Schwellwerte für den Ladezustand der Wechselbatterien eingetragen. Vorgegeben wird auch die Dauer für die Bearbeitung eines Transportauftrags und die Dauer eines Batteriewechselvorgangs. In dem Simulationstool sind verschiedene Batteriewechselstrategien hinterlegt, die für einen Simulationslauf ausgewählt werden können. Somit kann mit

und ohne Wechselstrategie simuliert werden und direkt deren Wirksamkeit verglichen werden. Die Zustandsberechnungen werden für die Zeitfortschreibung in einem Raster von fünf Minuten durchgeführt.

Die **Abbildung 53** zeigt einen Auszug aus der grafischen Ergebnisdarstellung des Simulators. Es werden hier die Zustände der Wechselbatterien in der Station und in den Fahrzeugen über die Zeit dargestellt. Zu jedem Zeitschritt kann in dem Diagramm zur BWS (im oberen Bildteil) die Anzahl der ladenden Wechselbatterien („gelb“) und die Anzahl der bereits fertig geladenen Wechselbatterien („grün“) abgelesen werden. Entsprechend wird im Diagramm zu den AGVs (im unteren Bildteil) dargestellt, in welchem Zeitschritt eine an Bord befindliche Wechselbatterie fast leer ist und bald ein Batteriewechsel durchgeführt werden muss („gelb“) sowie noch eine ausreichende Ladungsmenge in der Wechselbatterie vorhanden ist („grün“). Sofern ein betriebskritischer Zustand („rot“) angezeigt wird, kann das AGV nicht weiter zur Bearbeitung von Transportaufträgen eingesetzt werden, da die verbleibende Restkapazität hierfür zu gering ist und in der Station keine Wechselbatterie für einen Wechsel verfügbar ist. Dieser Zustand tritt ebenfalls auf, wenn die Station gerade nicht zugänglich ist, weil sich dort ein anderes AGV auf der Wechselposition befindet.

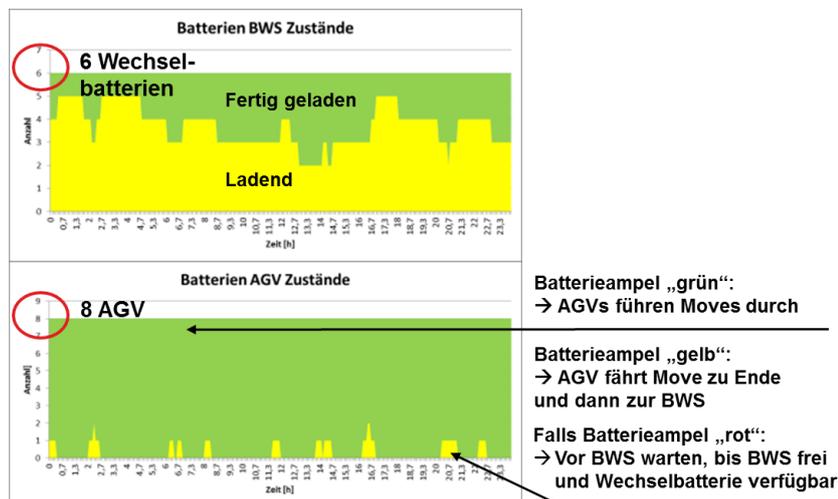


Abbildung 53: Grafische Ausgabe des Simulators bezüglich der Auswirkungen von Batteriewechselstrategien

In **Abbildung 54** wird beispielhaft auf die Untersuchung bestimmter Betriebssituationen wie zum Beispiel einem Engpass in der Station eingegangen. Auf der einen Seite können durch tabellarische Eingabe für die oben benannten Parameter unterschiedliche Betriebssituationen mit dem Simulator durchgespielt werden (siehe linker Bildteil). So kann einfach für den Anfang des betrachteten Zeitraums eine ungünstige Verteilung der Batterieladestände vorgegeben werden. Im Verlauf der Berechnungen hat dies im abgebildeten Beispiel zur Folge, dass bei mehreren Wechselbatterien an Bord der AGV der Ladezustand gleichzeitig von „grün“ auf „gelb“ wechselt (links oben im Bild). Das heißt es tritt gleichzeitig Bedarf für einen Batteriewechsel ein und es kommt zu Wartezeiten vor der Station. Bei einigen AGV wechselt der Batteriezustand im weiteren Verlauf erwartungsgemäß auf „rot“. Damit wird sogleich eine Betriebssituation im Simulator nachgestellt, in welcher in der Station eine unzureichende Anzahl von Wechselbatterien verfügbar ist (links unten im Bild).

Auf der anderen Seite kann durch Auswahl bestimmter Batteriewechselstrategien überprüft werden, wie sich das Gesamtsystem bei einer logistischen Optimierung verhält bzw. ob die entsprechende Betriebssituation auf diese Weise bewältigt werden kann (siehe rechter Bildteil). Durch das zeitliche Vorziehen von einigen Batteriewechseln um einen vergleichsweise kurzen Zeitraum kann das Transportsystem so beeinflusst werden, dass Wartezeiten vor der Station vermieden werden. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass durch das Vorziehen

von Batteriewechseln um einen längeren Zeitraum sichergestellt werden kann, dass immer Wechselbatterien in einer ausreichenden Anzahl zur Verfügung stehen. Hierbei muss als Planungszeitraum die Gesamtladedauer einer Wechselbatterie betrachtet werden.

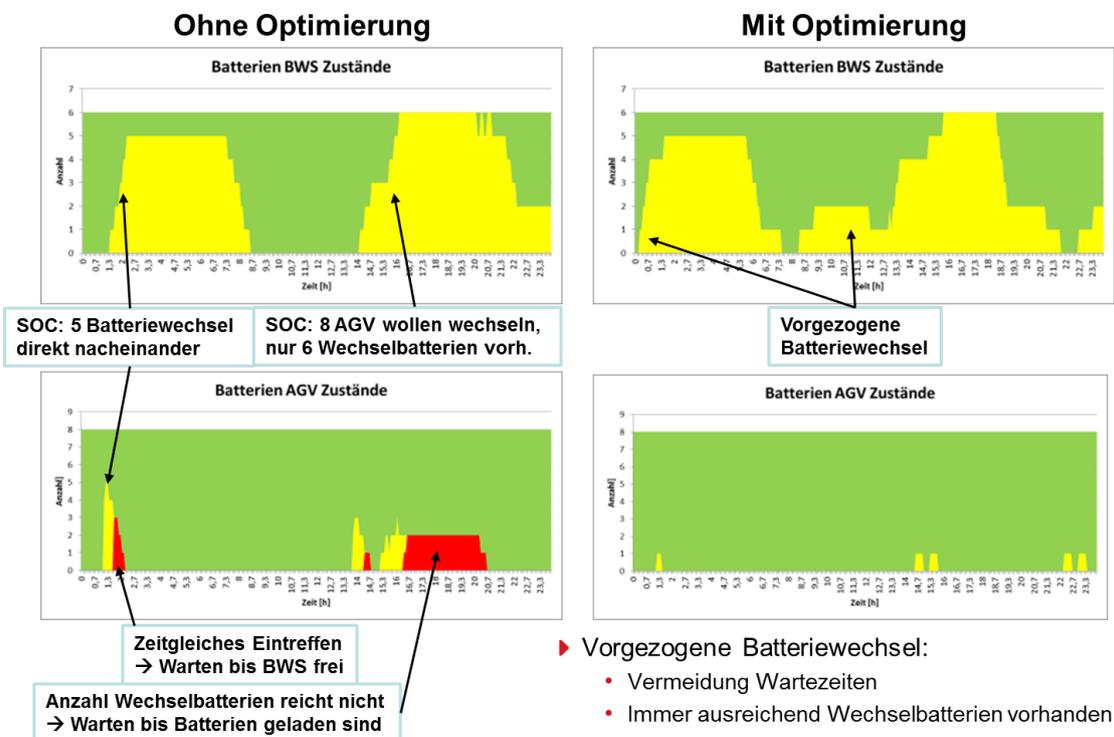


Abbildung 54: Untersuchung von Batteriewechselstrategien bei Verwendung von Blei-Batteriesystemen mit Simulator

In den bislang vorgestellten Ergebnissen ist der Simulator mit den Parametern der Blei-Batteriesysteme konfiguriert worden. Neben diesen Untersuchungen wurde der Simulator auch im Hinblick auf die Verwendung von Lithium-Batteriesystemen eingestellt. Hierbei wird die grundsätzliche physikalische Eigenschaft der Lithium-Batteriesysteme berücksichtigt, dass sie sehr schnell geladen werden können und somit nach kurzer Zeit wieder für Batteriewechsel bereitstehen.

Für die Untersuchung der Lithium-Batteriesysteme im Simulator wurde eine Ladedauer von 2 Stunden angenommen. Dies wiederum führt dazu, dass deutlich weniger Wechselbatterien zum Betrieb der AGV benötigt werden. Im Simulator wurde die Situation abgebildet, dass bei acht AGV nur zwei Wechselbatterien extra vorhanden sind. Tritt nun die Situation auf, dass bei nur drei AGV ein ähnlicher Ladezustand vorhanden ist und somit kurz hintereinander Batteriewechsel anstehen, muss eines dieser AGV bereits warten, bis wieder eine Wechselbatterie geladen ist. Einerseits sind die Wartezeiten von dann 2 Stunden (Ladedauer eines Lithium-Batteriesystems) an sich nicht sehr lang. Andererseits würde sich der Engpasszustand im alltäglichen Betrieb oftmals ereignen und grundsätzlich im Gegensatz zur Anwendung des Batteriewechselkonzepts stehen. Dies zeigt, dass eine logistische Optimierung der Wechselvorgänge bei Lithium-Batteriesystemen aufgrund der geringen Anzahl an Wechselbatterien im Pool von erheblicher Bedeutung ist. Die Anwendung des Simulators mit logistischer Optimierung konnte zeigen, dass in diesem Fall das Vorziehen von Batteriewechseln sehr sinnvoll ist. In **Abbildung 55** wird aufgedeckt, dass ein betriebskritischer Zustand („rot“) effektiv vermieden werden kann.

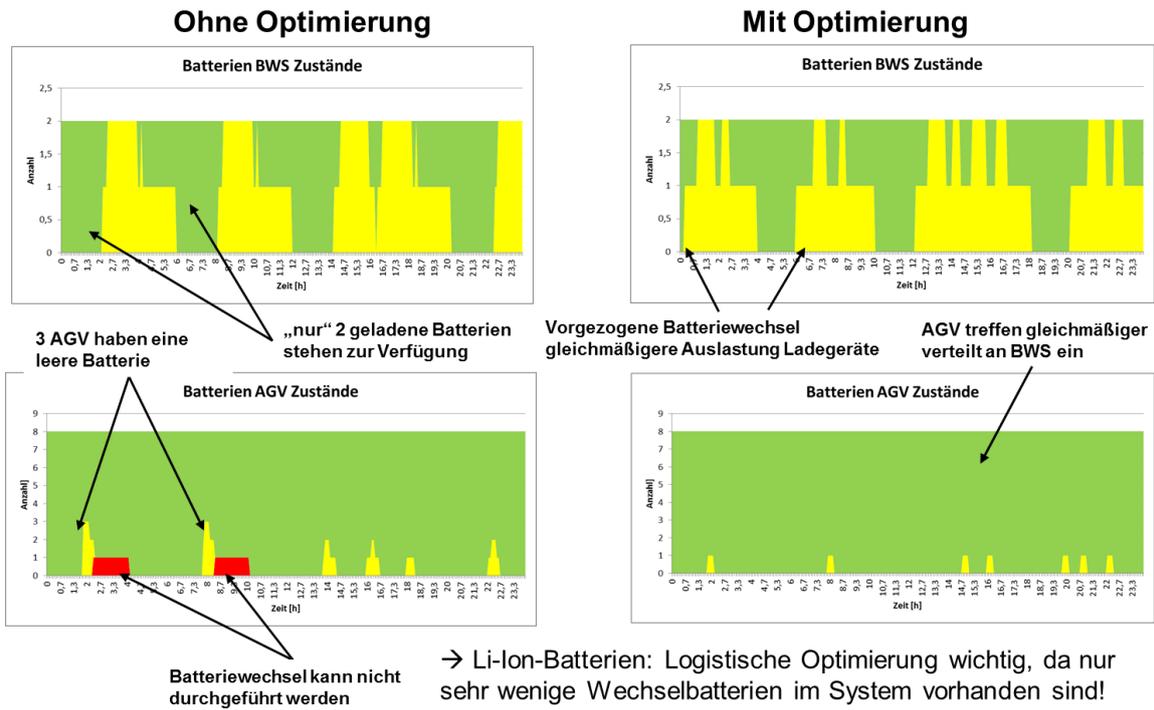


Abbildung 55: Untersuchung von Batteriewechselstrategien bei Verwendung von Lithium-Batteriesystemen mit Simulator

3.6 Testverfahren zu logistisch optimierten Batteriewechseln

Zur Überprüfung der Funktionalität des BVS hinsichtlich der logistisch optimierten Batteriewechsel wurde ein entsprechendes Testverfahren durchgeführt. Zunächst wurde über eine manuelle Vorgabe bei allen beteiligten AGV ein Batteriewechsel in vorgenommen, unabhängig vom aktuellen Ladezustand der Batterien. Hierdurch wurde ein einheitlicher Ladezustand bei den B-AGV hergestellt. Im Anschluss wurden in der BWS alle Wechselbatterien bis auf zwei Stück für den Betrieb gesperrt, es wurde also künstlich eine Verknappung an Batterien hergestellt.

Im folgenden Betrieb wurden die AGV dann etwa gleichmäßig eingesetzt und der Ladezustand der einzelnen Fahrzeuge sank stetig ab. Der Ladezustand der Batterien in den AGV und in der BWS wurde durch das BVS gemäß den Strategien für logistisch optimierten Batteriewechsel überprüft. Nach einigen Stunden wurden dann AGV mit dem jeweils geringsten Ladezustand - jedoch noch über der eigentlichen unteren Grenze – vorzeitig zu einem Batteriewechsel beordert, so dass ein durchgehender Betrieb sichergestellt werden konnte. Auch mit der für den Versuch deutlich reduzierten Anzahl von Wechselbatterien konnte die Versorgung der AGV mit Wechselbatterien sichergestellt werden. Durch den Versuch konnte die Funktionsfähigkeit der logistisch optimierten Batteriewechsel und die Wirksamkeit der theoretischen Überlegungen nachgewiesen werden.

3.7 Weiterentwicklung des Demand Response Systems (DRS)

Während der Flottenversuche mit gesteuertem Laden nimmt VATTENFALL die Rolle eines Aggregators für die Vermarktung von Flexibilität aus einem Pool verschiedenartiger Anlagen wahr. Es zählt zu den Aufgaben eines Aggregators, die Flexibilität unterschiedlicher Anlagen von Einspeise- wie auch von Entnahmeseite zusammenzustellen und einen Zugang zum Regelleistungsmarkt zu vermitteln. Im Rahmen des BESIC-Projekts wurde überprüft, inwieweit die Flexibilität eines Containerterminalbetriebs beispielsweise mit der Flexibilität eines Blockheizkraftwerks aggregiert werden kann. Wie in **Abbildung 56** überblicksartig zu sehen, wurde dazu auf der Seite der Energiewirtschaft das so bezeichnete Teilsystem DRS eingerichtet.

Als Basis dieses Teilsystems dient eine gesonderte Installation einer auch produktiv einsetzbaren Aggregationsplattform (das von cyberGRID GmbH entwickelte Demand Response Network Operation Center, kurz DR-NOC), welche als Mittelstück zwischen dem Markt und den schaltbaren Ressourcen funktioniert. Darin sollten im Rahmen von BESIC neben der Batterieladestation des Containerterminalbetriebs weitere Anlagen gewerblicher Entnahmestellen (reale Ressourcen) und deren virtuelle Vervielfältigungen (simulierte Ressourcen) betrieben werden. Die übrigen Anlagen stammten aus zwei Hotelbetrieben, einem Einkaufszentrum, einem Bürogebäudekomplex, einem Chemieunternehmen, einem produzierenden Unternehmen sowie dem Betrieb einer Wasserstofftankstelle. Die Batterieladestation kann aus dem Containerterminalbetrieb heraus nunmehr über einen auf dem Standard OpenADR basierenden Kommunikationsweg (VEN auf Terminalseite und VTN auf Energiewirtschaftsseite) erreicht werden. Die übrigen Anlagen werden mit Hilfe der jeweiligen Treiber für verschiedene Kommunikationsstandards wie zum Beispiel aus der Fernwirktechnik (IEC 60870-5-104) oder zur Zählerfernauslesung (DLMS/COSEM) angesprochen.

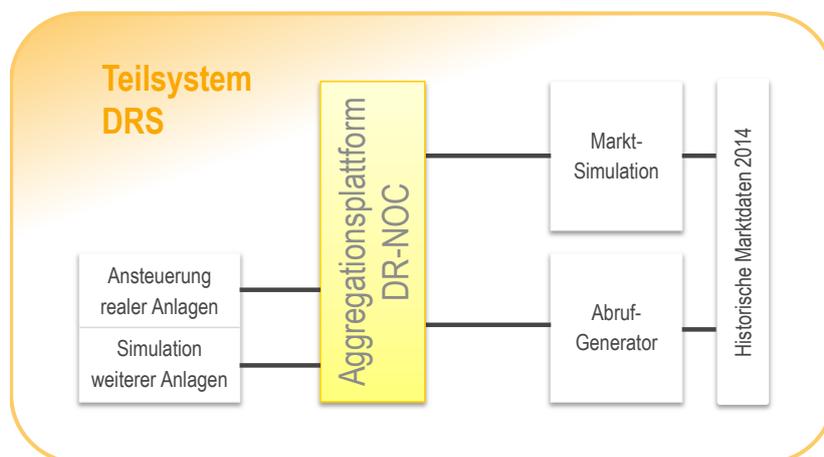


Abbildung 56: Überblick der Anwendungskomponenten im Teilsystem EXT

Auf der Grundlage der vom Containerterminalbetrieb und den übrigen dezentralen Anlagenbetreibern angegebenen Flexibilität können vom DR-NOC gemeinsame Gebote erstellt und in den Tagesausschreibungen für Minutenreserve platziert werden. Anhand historischer Marktdaten für das Jahr 2014 wird innerhalb des Teilsystems DRS berechnet, welcher Grenzleistungspreis sich für den jeweils nachgespielten Tag ergibt und welche Gebote dementsprechend neben den bekannten Ausschreibungsergebnissen mit einem Zuschlag zu versehen sind. Da es ebenso gut sein kann, dass bedingt durch die Gebotserstellung für den gesamten Anlagenpool und nach der Zuschlagserteilung eines Regelzonenverantwortlichen nur ein Teil der angegebenen Flexibilität des Containerterminalbetriebs zum Tragen kommt, werden im Rücklauf zum Flexibilitätsangebot die Vermarktungsinformationen übermittelt. Außerdem wurde für das Teilsystem DRS ein Abrufgenerator entwickelt, der gemäß der für das Jahr 2014 verzeichneten Regelleistungsbedarfe anstelle eines Regelzonenverantwortlichen gegen-

über dem DR-NOC die Abrufe vorgibt. Die künstlich generierten Abrufe richten sich für den gesamten Anlagenpool an das DR-NOC. Dieses zieht entsprechend der Tags voraus angegebenen Flexibilität und der im Moment des Abrufs angezeigten Verfügbarkeit (Opt-In/Opt-Out) einzelne Anlagen zur Regelenergieerbringung heran.

3.8 Entwicklung eines Werkzeugs zur Ausführung energiewirtschaftlicher Ablaufpläne

Das Werkzeug für die Ablaufplanausführung VisExec ist eine Anwendungskomponente mit eigener graphischer Benutzungsoberfläche innerhalb des Teilsystems EMS. Es beinhaltet die fortlaufende Revision und Live-Korrektur des Ablaufplans, die Registrierung von Wechselbatterien in der Station, das Management der Ladeverläufe, die Behandlung von Abschaltungen zur Vermeidung von Verbrauchsspitzen sowie die Verarbeitung externer Abrufe zur Regelenergieerbringung und die anschließend notwendige Kompensation. In der **Abbildung 57** wird ein Überblick zu vorgenannten Subkomponenten gegeben.

Während der Ausführung eines Ablaufplans werden in kurzen regelmäßigen Zeitabständen (Kurzzeitintervall von etwa fünf bis zehn Sekunden) zwischen dem EMS und dem BVS die Zustandsinformationen für die Wechselbatterien und Ladegeräteeinheiten sowie die Steuerungsinformationen für die Ladestellen ausgetauscht. Es wird dafür gesorgt, dass seitens EMS immer ein aktueller Schnappschuss der Ladezustandswerte der Wechselbatterien vorliegt. Zusätzlich wird ein Schnappschuss darüber eingeholt, welche Ladestellen der Station mit welchen Wechselbatterien belegt sind. Nach jeder Aktualisierung wird geschaut, ob die kurzzeitige Ladezustandsentwicklung in der Tat der aus dem vorliegenden Ablaufplan entspricht. Außerdem ist in der Ablaufplanrevision zu überprüfen, ob der Gesamtverbrauch des Containerterminals über die Zeit so eintritt wie vorhergesehen. Sollte sich eine gravierende Abweichung in der Ladezustandsentwicklung der Wechselbatterien, des Gesamtverbrauchs des Containerterminals oder einem weiteren Kriterium des Geplant-Ist-Vergleichs bemerkbar machen, so wird die Ablaufplanausführung seitens EMS eingestellt und gegenüber dem Teilsystem DRS die Nichtverfügbarkeit mitgeteilt. Im Kurzzeitintervall wird ebenfalls daraufhin geprüft, ob sich eine Veränderung bei der Belegung der Ladestellen ergeben hat. Wird für eine bestimmte Ladestelle eine Wechselbatterie angegeben, nachdem diese zuvor unbelegt schien, so kann vom EMS der Abgabevorgang nachvollzogen werden. Es wird im Ablaufplan nachgesehen, ob sich die betreffende Wechselbatterie überhaupt zur jeweiligen Zeit in der Station befinden sollte und ob sie laut Plan an eben dieser oder einer anderen Ladestelle zugeordnet ist. Bei abweichender Zuordnung kann der Ablaufplan richtiggestellt werden, indem die restlich für den Tag geplanten Einsatzsequenzen der tatsächlich abgegebenen Wechselbatterie und der für die tatsächlich belegte Ladestelle vorgesehenen Wechselbatterie vertauscht werden. Derartige Live-Korrekturen können ohne Beeinträchtigung des Ablaufplans vollzogen werden, da die Ladestellen planerisch als eine Sammelressource berücksichtigt werden.

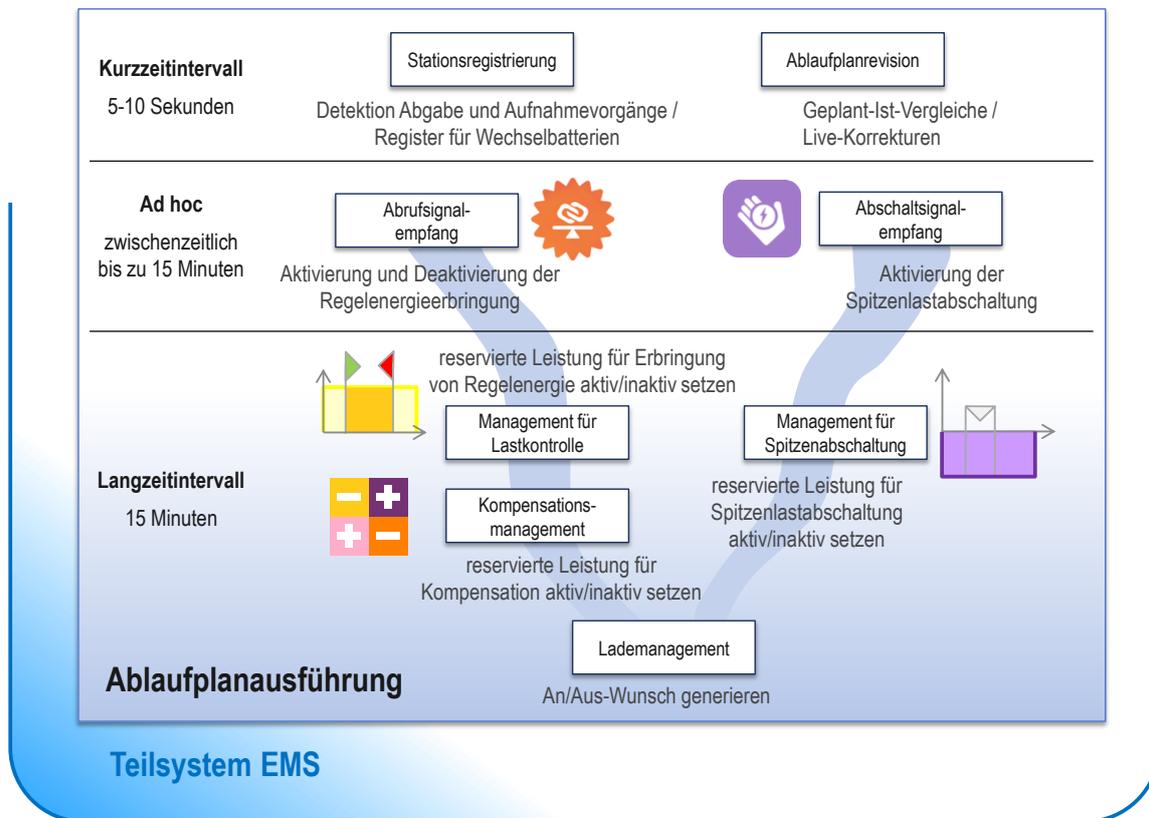


Abbildung 57: Überblick zu den Subkomponenten der Ablaufplanausführung innerhalb des EMS

Sobald die Abgabe einer Wechselbatterie festgestellt wurde, wird diese als in der Station befindlich vermerkt. Das Lademanagement arbeitet grundsätzlich mit den Wechselbatterien entsprechend des geplanten Stationsaufenthaltszeitraums und des festgelegten Ladeverlaufs. Zum Zeitpunkt der Registrierung der Wechselbatterie wird die festgelegte Ladeleistung im Ablaufplan einzeln nachgeschlagen. Je nach Festlegung wird daraufhin per An/Aus-Wunsch innerhalb der Automatisierungsprozedur einem automatisierten Start des Ladens stattgegeben oder das Laden unterbunden. Auf diese Weise kann der Ladeverlauf wie geplant aufgegriffen werden. In der Folge wird immer zu Beginn einer Viertelstunde (oder im Langzeitintervall je nach Zeiteinteilung des Ablaufplans) der Ladeverlauf von sämtlichen in der Station befindlichen Wechselbatterien verfolgt. Der Lademanager ermittelt dabei den An/Aus-Wunsch in Verrechnung der festgelegten Ladeleistung mit der aktivierten Leistung für die Erbringung positiver oder negativer Regelenergie, für die Abschaltung zur Vermeidung von Spitzenverbrauch oder für die Kompensation ermittelt wird. Während eine bestimmte Wechselbatterie einer Lasterhöhung unterliegt (weil zur Erbringung positiver Regelenergie abgerufen worden ist) und laut Plan eine Ladeleistung von null gewählt worden ist, würde beispielsweise der An/Aus-Wunsch auf den An-Wert einzustellen sein. Zwischenzeitlich kann ein Abruf zur Erbringung von Regelenergie oder zur Abschaltung wegen Spitzenverbrauchs beim EMS eingehen. Der Abschaltmanager reagiert auf interne Abrufe, indem er für sämtliche Wechselbatterien eine Abschaltleistung aktiv setzt und falls erforderlich den An/Aus-Wunsch sofortig auf den Aus-Wert umstellt. Vom Teilsystem DRS werden externe Abrufe an das EMS gerichtet; sie werden vom Manager für die Lastkontrolle als eine Abfolge von Aktivierungs- und Deaktivierungszeitpunkten verarbeitet. Bei Erreichen eines Aktivierungszeitpunkts überprüft der Lastkontrollmanager die in der Station befindlichen Wechselbatterien und schaut wo Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial zur Vorhaltung von Minutenreserveleistung im Ablaufplan reserviert ist. Eine dementsprechende Leistung kann dann bei einer oder mehreren Wechselbatterien für die Regelenergieerbrin-

gung aktiv gesetzt werden. Eine Wechselbatterie unterliegt der Lasterhöhung bzw. Lastabsenkung bis dass sie bei einem nächsten Deaktivierungszeitpunkt durch den Manager inaktiv gesetzt wird oder bis zum Ende der laufenden Viertelstunde. Zu Beginn einer Viertelstunde wird durch den Manager für die Lastkontrolle überprüft, ob ausgehend von den betreffenden Wechselbatterien weiterhin das Zuschalt- oder Abschaltpotenzial für die Regelenergieerbringung reserviert ist. Gegebenenfalls muss er durch Umschaltung in die Wege leiten, dass eine Wechselbatterie bei der Regelenergieerbringung von einer anderweitigen Wechselbatterie abgelöst und somit der Lastkontrolle unterstellt wird. Des Weiteren berechnet der Manager für die Lastkontrolle, wie viel positive und negative Regelenergie von jeder der Wechselbatterien innerhalb ihres aktuellen Stationsaufenthaltszeitraums erbracht worden ist.

Eine Kompensation sollte so rasch wie möglich vollzogen werden. Darum ist der Manager für die Kompensation um alle Wechselbatterien bekümmert, die sich in der Station aufhalten und nicht der Lastkontrolle unterliegen. Er schlägt zu Beginn einer Viertelstunde im Ablaufplan nach, ob ein Zuschalt- oder Abschaltpotenzial für die Kompensation reserviert worden ist. Sollte für eine einzelne Wechselbatterie ein Differenzbetrag zwischen der erbrachten positiven und der erbrachten negativen Regelenergie vermerkt sein, so wird dem entgegen eine Leistung durch den Kompensationsmanager aktiv gesetzt. Dem Langzeitintervall folgend werden immer zuerst der Lastkontrollmanager, dann der Kompensationsmanager und zuletzt der Lademanager tätig.

3.8.1 Anbindung zwischen EMS und DRS

Für die datentechnische Einbindung der Batterieladestation in den Anlagenpool bei VATTENFALL wurde das bei einer oben beschriebenen Evaluierung ausgewählte Datenaustauschformat OpenADR genutzt. Das Datenaustauschformat OpenADR ist ursprünglich dazu bestimmt gewesen, Stromendkunden Preissignale mitteilen zu können und somit deren Energieverhaltensverhalten beeinflussen zu können. Es ist im US-amerikanischen Raum entstanden und hat in der Version 2.0 verbreitete Anwendung gefunden. OpenADR beschreibt Aufbau und Inhalt von Nachrichten in einem XML-Format. Es gibt XML-Schemavorgaben für einzelne Nachrichtentypen. Es gibt zum Beispiel Nachrichten für das Signalisieren variabler Strombezugspreise sowie die Übermittlung von Messdaten zum Stromverbrauch. Darüber hinaus sind Nachrichten dafür vorgesehen, zu einer Reduzierung des Stromverbrauchs aufzurufen und so weiter. Es ist freilich möglich, dass sich Endkunden an einem solchen Aufruf zur Abschaltung von Endgeräten nicht beteiligen möchten. Dann können sie mit einer entsprechenden Nachricht auf einen solchen Aufruf reagieren und den Teilnahmestatus anzeigen. Daneben wird in OpenADR die Interaktion zwischen Aggregator/Lieferant und seinen Endkunden beschrieben. Diesbezüglich wurde in OpenADR ein Top-Down-Ansatz gewählt, der über- sowie untergeordnete Aggregationsknoten (engl. sogenannte Virtual Top Nodes, VTN) und Knoten von Endverbrauchern (engl. sogenannte Virtual End Nodes) und jeweils übergeordneten Knoten beschrieben.

Der VTN verwaltet selbständig die Kommunikation mit dem VEN; diese kann entweder mittels Anfragen über eine direkte HTTP-Verbindung zwischen VEN und VTN oder mit sogenannten Stanzas über zwei separate Verbindungen von VEN und VTN zu einem gemeinsamen XMPP-Server geschehen. Die ausgetauschten OpenADR-Nachrichten werden in einer lokalen Datenbank gespeichert und je nach Typ über Webservices (WSDL, für Fahrpläne etc.) oder Java Message Service (JMS, für Messdaten und Abrufe) inhaltlich an das DR-NOC weitergegeben.

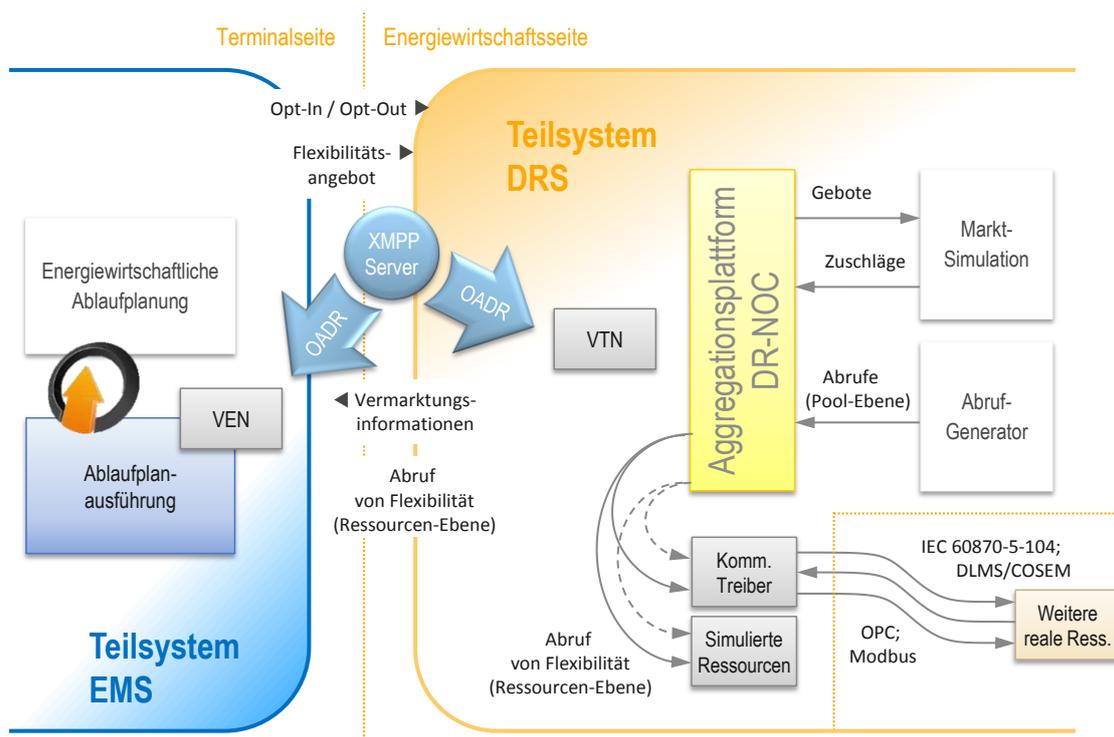


Abbildung 58: Detailblick für die Informationsschnittstelle zwischen dem EMS und dem Teilsystem EXT

Für unterschiedliche energiewirtschaftliche Geschäfts-/Anwendungsfälle sollten zwischen dem Energie-Management-System auf der Terminalseite und dem Managementsystem für den Betrieb eines virtuellen Kraftwerks auf Aggregatorensseite folgende Daten ausgetauscht werden:

- In der Richtung von EMS an EXT:
 - Vorhersagedaten für den Gesamtlastgang des Containerterminals, die am Tag voraus mit Hilfe von Lastgangsimulation o. Ä. gewonnen werden können.
 - Informationen über verfügbare Flexibilität in den am Vortag geplanten Ladeprozessen, womit der Verlauf des für ein Angebot von Regelleistung veräußerlichen Zuschalt- und Abschaltpotenzials in der Batteriewechselstation gemeint ist.
 - Messdaten des Energieverbrauchs des gesamten Terminals oder ersatzweise Messdaten der Leistungsaufnahme der Batteriewechselstation (der mit Abrufereignissignalen zu steuernden Einheit) für den Nachweis einer Erbringung von Regelleistung
- In der Richtung vom DRS an EMS-TS2:
 - Informationen über die erfolgte Vermarktung der verfügbaren Flexibilität, das heißt welches Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial zur Vorhaltung von Regelleistung über die Batteriewechselstation tatsächlich in Gebrauch zu nehmen ist.
 - Signale zur Aktivierung und Deaktivierung der Anlage in Bezug auf die Erbringung von Regelleistung

Die **Abbildung 59** zeigt den Verlauf des Nachrichtenaustauschs zwischen den verschiedenen Teilsystemen während der Flottenversuche mit gesteuertem Laden schematisch. Damit ist eine zeitliche Einordnung der Datenverkehre auf den Tag der Planung (D-1), den Tag der Ausführung eines energiewirtschaftlichen Ablaufplans im Terminal (D) und den darauffolgenden Tagen (D+x).

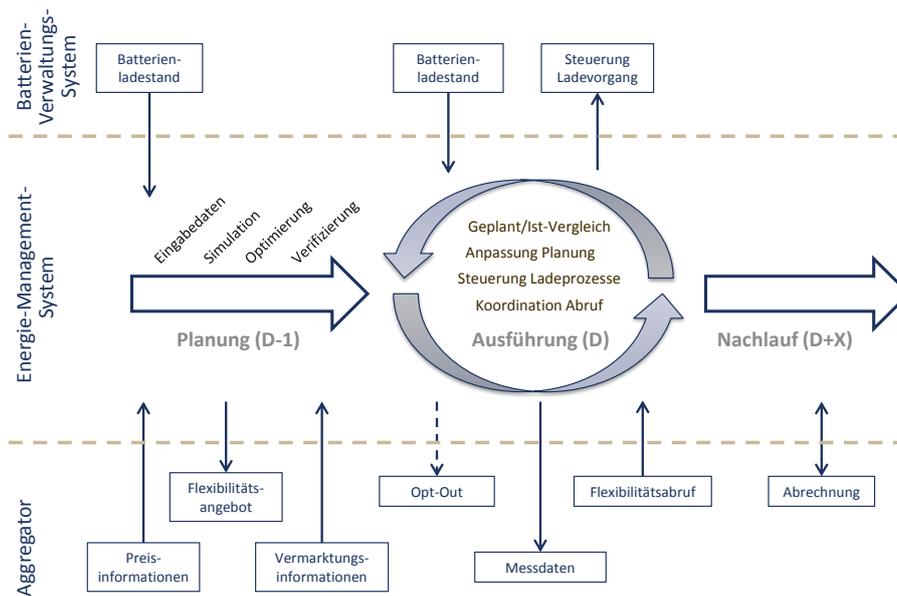


Abbildung 59: Schematische Darstellung des Kommunikationsverlaufs für das gesteuerte Laden

Im Sinne der Kommunikationsstruktur von OpenADR deckt das Energie-Management-System des Containerterminals die Funktionalitäten eines VEN ein während das Demand Response System des Aggregators als VTN fungiert. Die Spezifikation von OpenADR gibt dabei neben allgemeinen Architekturvorgaben vor allem die einzelnen Nachrichtenbestandteile als XSD-Schemata vor, deren Ausprägung als schemakonforme XML-Dateien für den Austausch der verschiedenen Informationen genutzt werden können. Für regelmäßige Übermittlung von Messdaten aus dem Containerterminal wurden Nachrichtentypen aus dem Berichtsdienst (engl. OpenADR Report Service) aufgegriffen. Dem Ereignisdienst (engl. OpenADR Event Service) sind die Nachrichtentypen für die Abrufsignalisierung zuzuordnen. Der Empfang einer Nachricht mit Nutzdaten wird in OpenADR mit einer Bestätigungsnachricht quittiert. Für die eigentliche Nachrichtenübertragung auf der Transportschicht ist neben dem HTTP-Protokoll auch das XMPP-Protokoll durch die Spezifikation von OpenADR vorgesehen. Im Rahmen des BESIC-Projekts wurden zu Evaluierungszwecken für alle erforderlichen Datenverkehre entsprechende Nachrichtenschablonen aufgebaut. Diese ließen einschätzen, in welchem Umfang der Standard OpenADR in den einzelnen Geschäfts-/Anwendungsfällen genutzt wird. Zudem wurden die Interaktion in den Prozessschritten zwischen EMS und DRS für das BESIC-Projekt festgehalten, sofern dies nicht schon vollständig von der Spezifikation von OpenADR vorgegeben war. Für die Nachrichtenübertragung wurde im BESIC-Projekt das XMPP-Protokoll verwendet, da für die Entwicklung des VEN auf der Terminalseite auf eine entsprechende Basisimplementierung zurückgegriffen werden konnte. Für den VTN wird von der OpenADR Alliance eine zertifizierte Referenzimplementierung bereitgestellt, welche unter anderem vom Forschungsinstitut EPRI (Electric Power Research Institut) distribuiert wird. Diese unterstützt auf der Transportschicht sowohl das HTTP-Protokoll als auch das XMPP-Protokoll.

Insgesamt wurden für das BESIC-Projekt 36 Nachrichtenschablonen entworfen, die den Gesamtzusammenhang einer Erstellung energiewirtschaftlicher Ablaufpläne und deren Ausführung auf dem Terminal als flexibler Verbraucher abdecken. Dies schließt die Registrierung der Kommunikationsteilnehmer, Anforderung von Berichtsdaten, den Messdatenversand, Flexibilitätsangebot und die Signalisierung von Abrufen ein. Die Auflistung 1 zeigt exemplarisch eine solche Nachrichtenschablone für das Versenden von Messdaten (Nachrichtentyp „UpdateReport“) inklusive Beispielinhalten.

Auflistung 1 Exemplarische Nachrichtenschlange mit Beispieldaten

```

<oadrUpdateReport ...>
  <pyld:requestID>REPORT08</pyld:requestID>
  <oadrReport>
    <xcal:dtstart><xcal:date-time>2015-01-02T00:00:00Z</...></xcal:dtstart>
    <xcal:duration><xcal:...>PT1M</...></xcal:duration>
    <strm:intervals>
      <ei:interval>
        <xcal:dtstart><xcal:date-time>2015-01-02T00:00:00Z</...></xcal:dtstart>
        <xcal:duration><xcal:...>PT1M</...></xcal:duration>
        <xcal:uid><xcal:text>00</...></xcal:uid>
        <oadrReportPayload>
          <ei:rID>BWSMessdaten</ei:rID>
          <ei:confidence>100</ei:confidence>
          <ei:payloadFloat><ei:value>74</ei:value></ei:payloadFloat>
        </oadrReportPayload>
      </ei:interval>
    </strm:intervals>
    <ei:eiReportID>HHLABWS20150102_01</ei:eiReportID>
    <ei:reportRequestID>RR08</ei:reportRequestID>
    <ei:reportSpecifierID>HHLACTA_BWSMETERING</ei:reportSpecifierID>
    <ei:reportName>TELEMETRY_USAGE</ei:reportName>
    <ei:createdDateTime>2015-01-02T00:01:30Z</ei:createdDateTime>
  </oadrReport>
  <ei:venID>HHLA01EMS</ei:venID>
</oadrUpdateReport>
  
```

Nach Öffnung der Schnittstelle meldet sich der VEN am VTN an, indem die in **Abbildung 60** dargestellte eine Registrierungsprozedur „Handshake“ durchlaufen wird. Dabei werden dem VEN von dem VTN eine Kennzeichnung zuteilt, die Berichtsfähigkeiten gegenseitig ausgetauscht und eventuell bereits veröffentlichte Ereignisse abgefragt.

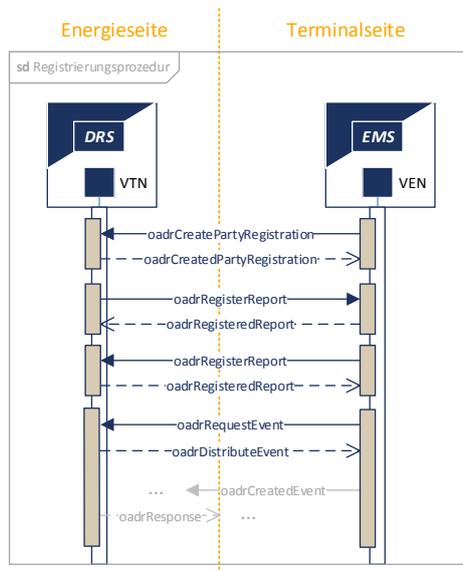


Abbildung 60: Interaktionsmuster für die Registrierung eines VEN beim VTN („Handshake“)

Die **Abbildung 61** zeigt ein Bildschirmfoto der graphischen Benutzeroberfläche der VTN-Komponente aus dem Teilsystem EXT. Darin ist ein Überblick der für die Batterieladestation angegebenen Berichtsfähigkeiten zu sehen. Die VEN-Komponente des EMS ist hier unter dem Namen HHLA registriert. Der VEN wurde im BESIC-Projekt so umgesetzt, dass er folgende regelmäßige Berichte an den VTN übermitteln kann:

- Die Vorhersage des Gesamtlastgangs des Terminals
LGANMELDUNGHHLA (als Nebenresultat eines Simulationsvorlaufs zur Planung)
- Das Flexibilitätsangebot FLEXDATEN (als Ergebnis der Planung) – bestehend aus einem voraussichtlichen Basisverbrauch der Station, dem Zuschalt- und Abschaltpotenzial sowie den geschätzten Opportunitätskosten
- Die momentane Leistungsaufnahme der gesamten Batteriewechselstation
HHLACTA_BWSMETERING (als Summe der Leistungsaufnahme der einzelnen Ladegeräteinheiten)
- Den Energieverbrauch des Gesamtterminals der letzten Viertelstunde
HHLACTA_TERMINALMETERING (als Ergebnis des internen Messstellenbetriebs im Containerterminal)

View	Specifier ID	Created Date/Time	Duration	Report Name
✓	LGANMELDUNGHHLA	March 9, 2016, 9:31 a.m.	P1DT	METADATA_TELEMETRY_USAGE
✓	FLEXDATEN	March 9, 2016, 9:31 a.m.	P1DT	METADATA_TELEMETRY_USAGE
✓	HHLACTA_BWSMETERING	March 9, 2016, 9:31 a.m.	PT10S	METADATA_TELEMETRY_USAGE
✓	HHLACTA_TERMINALMETERING	March 9, 2016, 9:31 a.m.	PT15M	METADATA_TELEMETRY_USAGE

View/Delete	Specifier ID	Created Date/Time	Duration	Report Name
✓ ✖	HHLACTA_BWSMETERING	March 16, 2016, 12:25 a.m.	None	TELEMETRY_USAGE

Abbildung 61: Übersicht der bekannt gemachten Berichtsfähigkeiten eines VEN im VTN und den zuletzt übermittelten Berichtsinhalten

Nachdem die Registrierungsprozedur erfolgt ist, hat der VTN mit einer Nachricht vom Typ „CreateReport“ die Möglichkeit, die entsprechenden Berichte einzeln anzufordern. Dazu nennt der VTN auch die gewünschte Intervalllänge und Berichtszeiträume in der entsprechenden Nachricht, was durch den VEN zu bestätigen ist. Anschließend sendet der VEN in den angeforderten Abständen mit dem Nachrichtentyp „UpdateReport“ die entsprechenden Berichtsdaten regelmäßig an den VTN. Der Empfang der Daten wird vom VTN immer mit einer Nachricht vom Typ „UpdatedReport“ bestätigt. Diese kann auch eventuelle Fehlercodes enthalten, sollte die Nachricht nicht korrekt oder inhaltlich fehlerhaft übersendet worden sein. Das entsprechende Interaktionsmuster ist in **Abbildung 62** dargestellt.

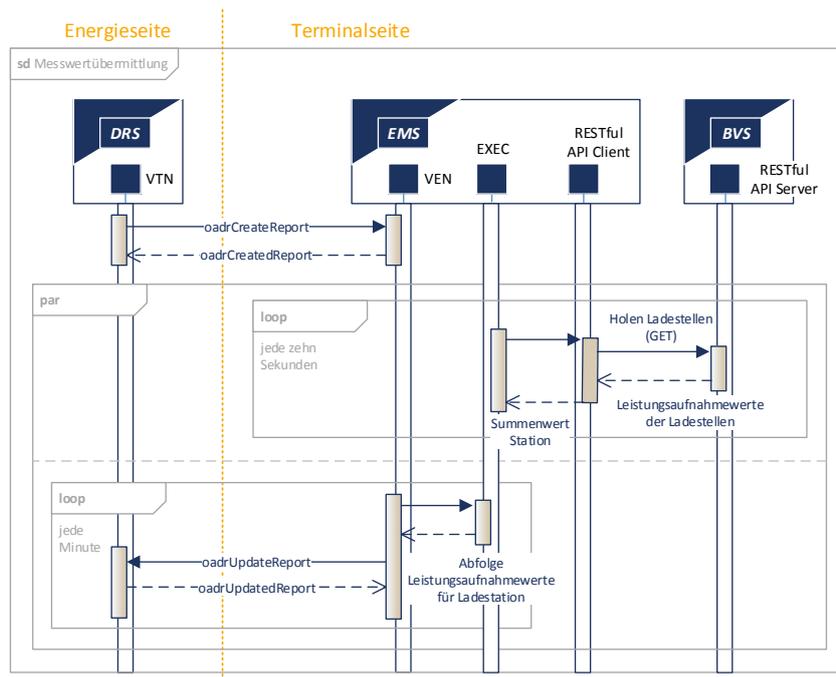


Abbildung 62: Interaktionsmuster für die Anforderung von Berichtsdaten und deren fortlaufender Versand

Im Gegensatz dazu werden die Nachrichtentypen aus dem Ereignisdienst von OpenADR für eine Informationsübermittlung ad hoc genutzt. Auf diese Weise sind im BESIC-Projekt insbesondere die Ankündigung eines Abrufs zur Erbringung von Regelenergie sowie die Aktivierungs- und Deaktivierungszeitpunkte zu kommunizieren. Die vom Teilsystem DRS erwartete Zuschalt- oder Abschaltleistung wird durch relative Werte ausgedrückt (Veränderung des Anlagenoffsets). Die Abrufe werden mit einer Vorlaufzeit von wenigen Minuten (einstellbar in der DR-NOC) übermittelt. In der **Abbildung 63** ist ein Bildschirmfoto von der Bearbeitung des Abrufereignisses CGEV1452565388155ID zu sehen. Dieses war auf eine Abrufdauer von einer Viertelstunde und den Aktivierungszeitpunkt 12.01.2016 03:30 Uhr eingestellt worden; es wurde vom VTN in der ersten Hälfte der vorausgehenden Viertelstunde, also gegen 03:22 Uhr, an den VEN übermittelt. Damit war eine Zuschaltleistung in Höhe von 80 kW angefordert worden. Ohne nähere Kenntnis seitens des Teilsystems DRS wurde dem Aktivierungszeitpunkt durch das EMS um etwa drei Minuten vorgegriffen, um eine rechtzeitige Zuschaltung zu gewährleisten.

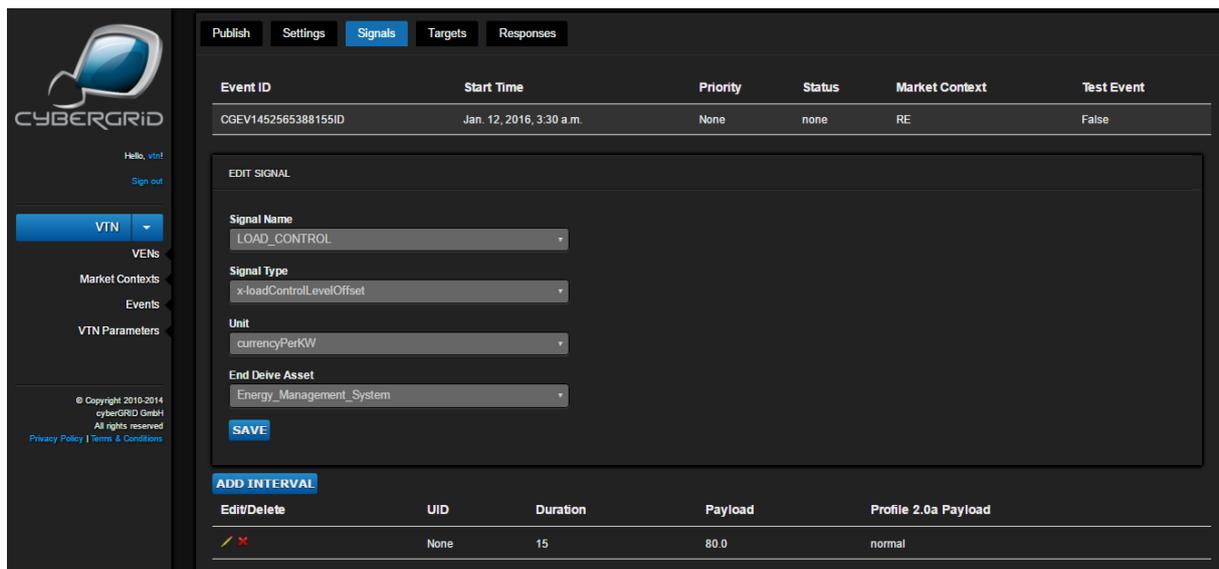


Abbildung 63: Eingabemaske in der VTN-Komponente für die manuelle Erteilung eines Abrufs zur Erbringung von Regelenergie

Für die Informationen über ein bevorstehendes Abrufereignis wird zum Beispiel der Nachrichtentyp „DistributeEvent“ genutzt. Wie in **Abbildung 64** zu sehen, wird der Empfang zuerst in besonderer Weise auf Transportschicht vom VEN bestätigt (leeres XMPP Stanza), bevor von ihm eine Nachricht vom Typ „CreatedEvent“ an den VTN rausgeht. In dieser Nachricht ist es für den VEN möglich, seine Bereitschaft zur Teilnahme am Abruf zu bestätigen („OptIn“) oder dieses Ereignis abzulehnen („OptOut“). Im Rahmen des BESIC-Projekts wird dieser Nachrichtentyp genutzt, um Regelenergieabrufe von der VTN an die VEN zu kommunizieren.

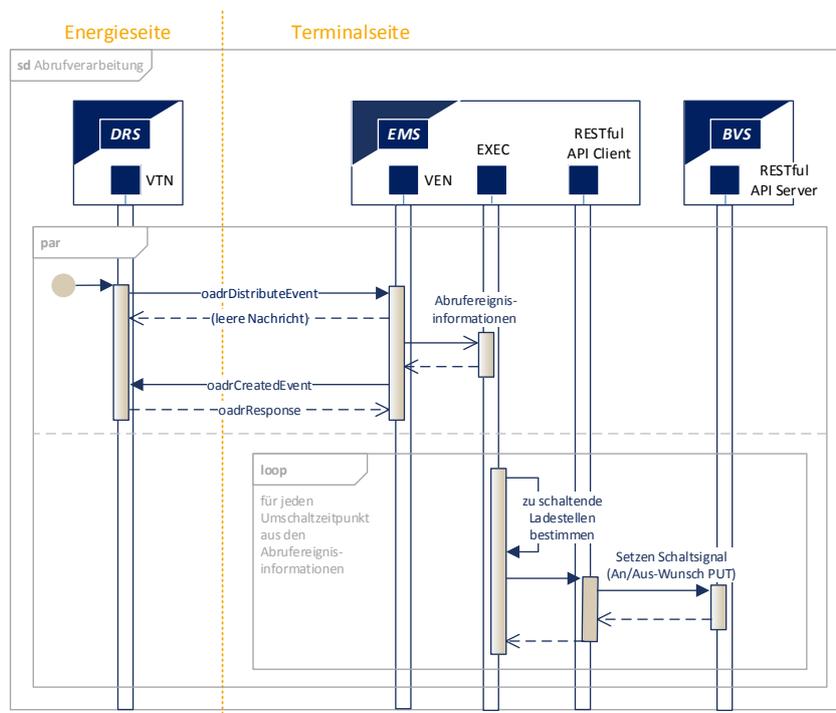


Abbildung 64: Interaktionsmuster für die Übermittlung von Daten mit Ereignischarakter

Zusätzlich zum Regelenergieabruf wird der Ereignisdienst von OpenADR im BESIC-Projekt auch genutzt, um den VEN über die Ergebnisse der Vermarktung der angebotenen Flexibilität zu informieren. Ursprünglich war hierfür vorgesehen, auf Interaktionsmuster und Nachrichtentypen des Berichtsdienstes zurückzugreifen. Doch schließ-

lich wurde eher der Ereignischarakter einer erfolgten Vermarktung gesehen als dass ein Berichtscharakter über die Ergebnisse der Vermarktung vorliegt.

Ein weiterer Nachrichtenaustausch über den Statusdienst (engl. OpenADR Opt Service) betrifft eine generelle Verfügbarkeitsmeldung für Abruf-Ereignisse. Für den VEN ist es möglich, dem VTN zu signalisieren, dass er für einen gewissen Zeitraum, z.B. den Rest des Tages, nicht für Regelenergieabrufe bereitsteht. Bei den Flottenversuchen mit gesteuertem Laden ist dies eine vielgebräuchliche Spielart, da die Ausführung eines Ablaufplans abgebrochen wird, insofern gravierende Planabweichungen hinsichtlich des Ladezustands der Wechselbatterien, des Gesamtverbrauchs der Terminals, etc. bekannt werden. Soll beispielsweise die Nichtverfügbarkeit angezeigt werden, so sendet der VEN eine Nachricht vom Typ „CreateOpt“ mit dem Inhalt einer Opt-Out-Meldung an den VTN. Demgegenüber wird im BESIC-Projekt eine Opt-In-Meldung getätigt, wenn das EMS mit der Ausführung eines Ablaufplans anfängt oder nach einem Abbruch zu fortgeschrittener Zeit wiedereinsteigt. In Auflistung 2 ist eine entsprechende Nachrichtenschablone mit Beispieldaten angegeben.

In der Regel werden Opt-In-Meldungen vom VEN einmal täglich oder nach erfolgreicher Registrierung übermittelt. Eine Opt-Out-Meldung wird typischerweise sofort nach Eintreten/Bekanntwerden einer Nicht-Verfügbarkeit, z. B. infolge einer Anlagenstörung, an den VTN übermittelt. Im BESIC-Projekt wurde vereinbart, dass ein vom VEN gemeldetes Opt-Out bis Tagesende aufrecht bleibt und beim Übergang zur Ausführung eines nächsten Ablaufplans, das bedeutet um Mitternacht, von einem neuen Opt-In aufgehoben wird.

Auflistung 2 Schablone für den Nachrichtentyp oadrCreatedOpt mit OptIn-Mitteilung

```
<oadrCreatedOpt ...>
  <ei:optID>OPT12345</ei:optID>
  <ei:optType>optIn</ei:optType>
  <ei:optReason>participating</ei:optReason>
  <emix:marketContext>RE</emix:marketContext>
  <ei:venID>HHLA01EMS</ei:venID>
  <xcal:vavailability>
    <xcal:components>
      <xcal:available>
        <xcal:properties>
          <xcal:dtstart><xcal:date-time>2015-01...</...></xcal:dtstart>
          <xcal:duration><xcal:...>P1DT</...></xcal:duration>
        </xcal:properties>
      </xcal:available>
    </xcal:components>
  </xcal:vavailability>
  <ei:createdDateTime>2015-01-02T00:01:30Z</ei:createdDateTime>
  <ei:eiTarget><ei:venID>HHLA01EMS</ei:venID></ei:eiTarget>
  <pyld:requestID>REQ07UR</pyld:requestID>
</oadrCreatedOpt>
```

Um auf der Seite der HHLA einen Überblick über die laufenden Berichte, etc. und die gesendeten Berichtsinhalte zu haben wurde eine grafische Benutzeroberfläche entwickelt, welche den Registrierungsstatus und den Status aus der letzten Verfügbarkeitsmeldung (Opt-In/Opt-Out), die zuletzt versendeten Messwerte sowie die letzten Versandzeitpunkte für die jeweiligen Berichte dargestellt. Des Weiteren kann der Eingang und die Behandlung von Vermarktungs- und Abrufereignissen verfolgt werden. Die **Abbildung 65** zeigt ein Bildschirmfoto des Hauptfensters der Kommunikationskomponente des EMS-TS2. Der aktuelle Opt-Status „Opt-In“ weist wie abgebildet darauf hin, dass der VEN grundsätzlich für den Empfang von Regelenergieabrufen bereit ist. In diesem Beispiel ist auch ein entsprechender Regelenergieabruf entgegengenommen worden. Zwischen 11:00Uhr und 11:15Uhr sollen 90 kW Leistung zugeschaltet werden.

BESIC
OpenADR VEN

VEN-Status		OPT-Status	
Status:	Registered	Status:	Opt In
ID:	359f65d4621b2885	Zeitpunkt:	17.11.2015 10:34:31

Report-Status		Messwerte	
BWS Metering	Reporting	17.11.2015 10:39:36	Letzter Messwert BWS: 98,00 kW
Terminal Metering	Reporting	17.11.2015 10:30:00	Letzter Messwert CTA: 1419,00 kWh
Flexdaten	Reporting	17.11.2015 10:34:08	

Abruf-Events

```

****NEW EVENT: 4ac59e7e80a6b7879392
17.11.2015 11:15:04: 0.0
17.11.2015 11:00:04: 90.0

```

Abbildung 65: Grafische Benutzungsoberfläche der Kommunikationskomponente (VEN) des EMS-TS2

3.8.2 Anbindung zwischen BVS und EMS

Mit der **Abbildung 66** wird genauer erklärt, welche Informationen zwischen dem **Teilsystem BVS** und dem EMS ausgetauscht werden und woher sie gewonnen werden können.

Im Batterien-Verwaltungs-System (BVS) werden in regelmäßigen Zeitabständen die Ladezustandswerte aller umlaufenden Wechselbatterien zusammengetragen. Befindet sich eine Wechselbatterie an Bord eines Fahrzeugs, so wird der aktuelle Ladezustand mit einer Fahrzeugsteuerung fortlaufend erfasst. Die Kennung der aufgenommenen Wechselbatterie wird im Zuge des letzten Wechselvorgangs festgehalten, so dass die Ladezustandswerte stets zuordenbar sind. Über eine WLAN-Verbindung werden die Ladezustandswerte einer oder mehrerer Fahrzeugsteuerungen schließlich an eine zentrale Datenhaltung weitergeleitet und dem BVS somit zur Verfügung gestellt. Befindet sich eine Wechselbatterie an einer Ladestelle in der Station, so wird die Kennung der angeschlossenen Wechselbatterie festgestellt und der aktuelle Ladezustand mit einer Ladegerätsteuerung fortlaufend erfasst. Über ein Modbus/TCP-Netzwerk zwischen dem BVS und den Ladegerätsteuerungen werden diese Ladezustandswerte schließlich abgefragt und für alle Ladestellen gesammelt.

Eine RESTful-API eröffnet dem EMS den gesicherten Zugriff auf die aktuellen Ladezustandswerte der Wechselbatterien und die aktuelle Belegung der Ladestellen in der Station. Während die Ladezustandswerte einer Tabelle der Wechselbatterien entnommen werden können, ergibt sich die aktuelle Ladestellenbelegung mit Einsicht in eine Tabelle für die Ladegeräteeinheiten. So kann das EMS einen Schnappschuss vom Umlauf der Wechselbatterien herstellen und Tags voraus eine Simulation des Logistikgeschehens bis zum Ende des kommenden Tages durchführen. Diese Simulationsergebnisse werden dann bei der Erstellung eines energiewirtschaftlichen Ablaufplans weiterverwendet.

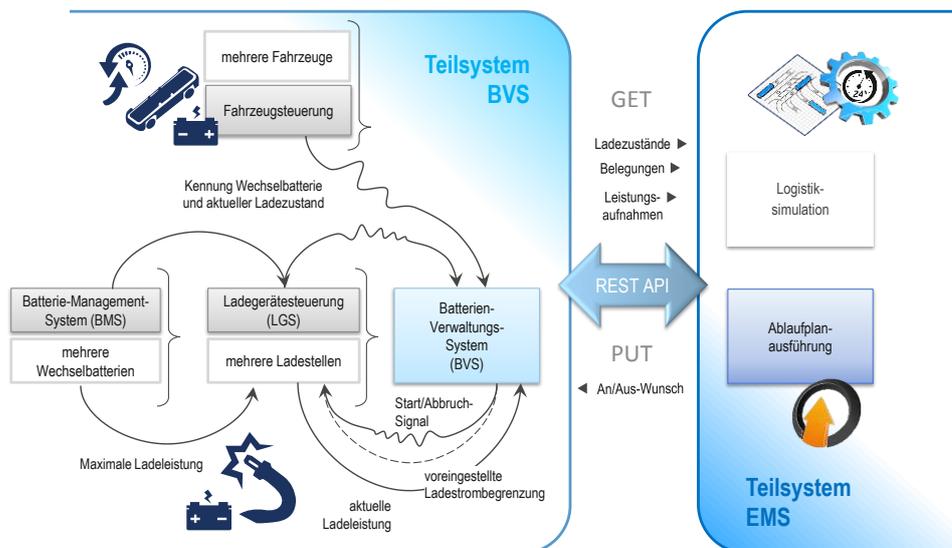


Abbildung 66: Detailblick für die Informationsschnittstelle zwischen dem Teilsystem BVS und dem EMS-TS2

Während der Ausführung eines Ablaufplans fragt das EMS in kurzen Zeitabständen die aktuellen Ladezustandswerte ab, um zu überprüfen, ob die vorgesehene/geplante Ladezustandsentwicklung soweit zutreffend gewesen ist. Außerdem wird fortlaufend die Belegung der Ladestellen nachvollzogen, um in bestmöglicher Übereinstimmung zum vorliegenden Ablaufplan die Abgabe einer Wechselbatterie an die Station oder die Aufnahme einer Wechselbatterie registrieren zu können. Hält sich eine Wechselbatterie wissentlich in der Station auf, so wird vom EMS mit dem An/Aus-Wunsch für die entsprechende Ladestelle gegenüber dem Teilsystem BVS signalisiert, wie der Ladeprozess in einen plangemäßen Verlauf gebracht und Steuerungseingriffe für eine Erbringung von Regelernergie sowie Kompensation des Ladezustands der Wechselbatterie ermöglicht werden können. Das EMS fragt über die RESTful-API aus der Ladegerätetabelle die Leistungsaufnahmewerte der Ladestellen ab, so dass es den Ladeprozess übergeordnet zum BVS kontrollieren kann. Sollte das BVS aus Dringlichkeit oder anderen Gründen den An/Aus-Wunsch ignorieren, kann dies vom EMS aus sich selbst detektiert werden und die Ablaufplan-ausführung in gravierenden Fällen suspendiert werden.

Für gewöhnlich gibt das EMS durch den An/Aus-Wunsch vor, wie der Ladeprozess innerhalb des Teilsystem BVS zu führen ist. Um in der Automatisierungsroutine nach der Kontaktierung einer Wechselbatterie an einer Ladestelle den Start des Ladens zu unterbinden, muss das EMS für die entsprechende Ladestelle einen Aus-Wunsch einstellen. Durch das BVS wird allein das Start/Abbruch-Signal gegeben; ein Ladevorgang mit Konstantstrom- und Konstantspannungsphase wird ansonsten selbsttätig durch die Ladegerätesteuerung geregelt.

In der **Abbildung 67** ist ein Ausschnitt aus der Benutzungsoberfläche des BVS mit einer Listenansicht für die Belegung des Hochregallagers in der Station dargestellt. Es werden hier sämtliche Lagerplätze aufgelistet, also auch diejenigen, die nicht mit einer Ladegeräteeinheit versehen sind. Im linken Abschnitt der Tabelle wird der geräteeigene Informationsstand für das Regalbediengerät gezeigt; im rechten Tabellenabschnitt findet letztlich sich der zentrale Informationsstand für das BVS. Insofern jede Bewegung des Regalbediengeräts protokolliert wird, kann aus der Geräteperspektive etwas eher auf den nächsten Informationsstand geschlussfolgert werden. Aus der zentralistischen Perspektive des BVS kommt der Informationsstand durch die protokollierten Bewegungsmeldungen des Regalbediengeräts, die Kennungen der Wechselbatterien und so weiter zu Stande. Über die Belegung der Regallagerplätze hinaus ist in der Perspektive des BVS bekannt, seit wann eine Wechselbatterie

an einem Regallagerplatz eingelegt ist und ob von dort aus eine datentechnische Verbindung zu der Wechselbatterie besteht. Für das BVS sind außerdem der operationelle Status der Ladegeräteeinheit und der Status des letzten Ladevorgangs sehr wichtig. In Bezug auf die Steuerungseingriffe durch das EMS wird im BVS vermerkt, wie oft an einer jeweiligen Ladestelle umgeschaltet worden ist seitdem eine Wechselbatterie eingelegt worden ist und wie der An/Aus-Wunsch aktuell lautet.

Regalbelegung

BES 1 ▾

autom. Aktualisierung alle: Sekunden

Download Regalbelegung

Aktualisieren

09.03.2016 16:04:34

Sync

sende Belegung an RBG

- 10 Chargers
- 10 unblocked Batteries
- 3 with charged date
- 2 wait
- 5 charging
- 2 chargingCompleted
- 814 A total output current min.
- 75 kW total output power min.

in RBG:

in BVS:

Position	Batterie	Batterie	Ladegerät	Status	verbunden	geladen seit	in BWS seit	# On/Off	Plan
1S1	empty								
1A0101	86-2	86-2	CHG1A01011	charging			15-11-23 12:26		1
1A0102	85-1	85-1	CHG1A01021	charging			15-11-23 12:42		1
1A0103	AD_014	AD_014	CHG1A01031	wait	+	please start charge	15-11-20 20:34	1	1
1A0104	AD_013	AD_013	CHG1A01041	chargingCompleted	+	15-11-22 03:35	15-11-21 23:00	1	1
1A0105	AD_004	AD_004	CHG1A01051	charging	+		15-11-23 11:41	1	1
1A0106	AD_101	AD_101	CHG1A01061	charging			15-11-23 14:19	1	1
1A0201	empty								
1A0202	AD_011	AD_011	CHG1A02021	cooldown	+	15-11-21 20:40	15-11-20 23:27	5	1
1A0203	AD_005	AD_005	CHG1A02031	charging	+		15-11-23 14:25	1	1
1A0204	AD_003	AD_003	CHG1A02041	chargingCompleted	+	15-11-23 12:25	15-11-23 11:50	1	1
1A0205	empty		CHG1A02051	wait					1
1A0206	AD_010	AD_010							



09.03.2016 16:04:34

© 2016 - TEREX Port Solutions - BVS Version: v1.05.00-0040

Abbildung 67: Bildschirmfoto Benutzungsoberfläche BVS: Regalbelegung mit Schaltvorgängen

Zur Durchführung der Flottenversuche wurde an den anzusteuern den Ladegeräten eine Reduzierung des maximalen Ladestroms vorgenommen. Durch das Herabsetzen des maximalen Ladestroms verlängert sich die Hauptladephase (Konstantstromphase) der auf Blei-Batteriesystemen basierenden Wechselbatterien auf über zwei Stunden, was die Chancen für die Vermarktung der Leistungsreserve deutlich erhöht. Darüber hinaus wurde der zulässige Abstand zwischen zwei extern angesteuerten Zu- und Abschaltungen auf zwölf Minuten heruntergestellt, so dass nun im Viertelstundenzeitraster der Regelungsmaßnahmen im Minutenreservemarkt genügende Umschaltmöglichkeiten gegeben sind.

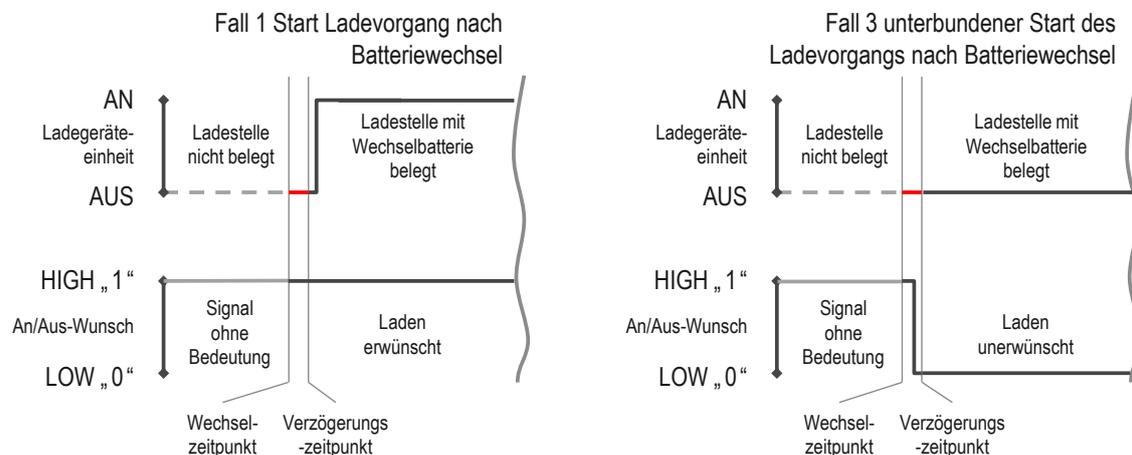


Abbildung 68: Veranschaulichung des Schaltverhaltens bezüglich des automatisierten Starts eines Ladevorgangs nach Batteriewechsel

Damit externe Abrufereignissignale korrekt seitens des EMS korrekt behandelt werden können, ist es wichtig, dass das BVS mit dem An/Aus-Wunsch nach einem vordefinierten Verhaltensschema verfährt. Es wurden mehrere betriebliche Gegebenheiten durchgesprochen, die dafür maßgeblich sind, wann der An/Aus-Wunsch vom BVS bewusst betrachtet und verarbeitet wird. Mit **Abbildung 68** kann das beabsichtigte Schaltverhalten in Bezug auf die Automatisierungsprozedur nach Kontaktierung einer Wechselbatterie an einer Ladestelle näher erläutert werden. Solange eine bestimmte Ladestelle nicht mit einer Wechselbatterie belegt ist, ist der An/Aus-Wunsch für das BVS bedeutungslos. Ist eine Wechselbatterie an einer Ladestelle eingelegt und dort kontaktiert worden, so wartet das BVS eine gewisse Zeitspanne (derzeit etwa 30 Sekunden lang) ab, bis es mit der Automatisierungsprozedur für diese Ladestelle fortfährt. Das EMS hat also eine Gelegenheit dazu, den Abgabevorgang für sich nachzuvollziehen und den An/Aus-Wunsch passend zum geplanten Ladeverlauf einzustellen. Im Fall 1 wird durch das BVS ein Ladevorgang sofortig gestartet; das EMS belässt den An/Aus-Wunsch bis zum Verzögerungszeitpunkt auf dem An-Wert und gibt sozusagen den Ladevorgang innerhalb der Automatisierungsprozedur frei. Im Fall 3 wird der automatisierte Start eines Ladevorgangs an einer bestimmten Ladestelle durch das EMS unterbunden, indem beim BVS rechtzeitig zum Verzögerungszeitpunkt der Aus-Wert angezeigt wird.

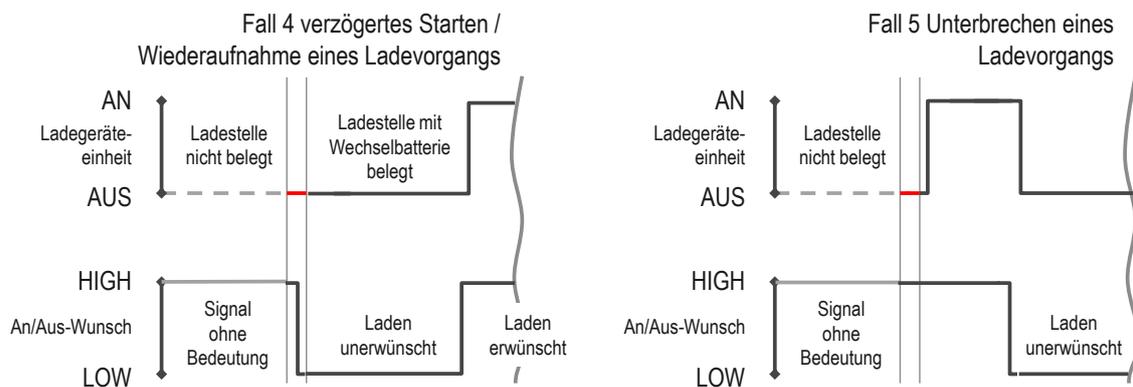


Abbildung 69: Veranschaulichung des Schaltverhaltens bezüglich der Unterbrechung und der Wiederaufnahme eines Ladevorgangs

Für das BESIC-Projekt ist vorgesehen worden, das BVS mit der Informationsschnittstelle lose an das EMS zu koppeln. Die operative Steuerung der Lade- und Batteriewechselvorgänge sollte hoheitlich beim BVS liegen; nötigenfalls müsste der An/Aus-Wunsch des EMS vom BVS ignoriert werden können. Zudem sollte sich ein Ausfall des EMS nicht fehlerträchtig für das BVS auswirken. Es wurde darum festgelegt, dass der An-Wert der Standardwert für den An/Aus-Wunsch ist. Ist die RESTful API für eine gewisse Zeitspanne (etwa 15 Minuten) nicht mehr vom EMS zugegriffen worden, so geht das BVS davon aus, dass seitens EMS die Ausführung eines Ablaufplans aufgegeben worden ist und setzt den An/Aus-Wunsch für sämtliche Ladestellen auf den Standardwert zurück. Eine Ladegeräteeinheit wird vom BVS eingeschaltet, insoweit der An-Wert angezeigt wird und die betreffende Wechselbatterie noch nicht komplett geladen worden ist. In der **Abbildung 69** kann das beabsichtigte Schaltverhalten in Bezug auf eine Unterbrechung und die Wiederaufnahme eines Ladevorgangs erläutert werden. Dabei ist anzumerken, dass das Laden durch Abschalten einer Ladegeräteeinheit ganz abgebrochen wird. Ist zuvor mit einer Wechselbatterie an einer Ladestelle geladen worden, so bedeutet das Anschalten einer Ladegeräteeinheit, dass zu einem neuen Ladevorgang angesetzt wird. Deshalb kann es erneut dazu kommen, dass ein geeigneter Ladestrom ermittelt wird und so weiter.

Im Normalfall wird also eine Wechselbatterie nach dem Batteriewechsel und der Kontaktierung mit der Ladegeräteeinheit direkt geladen. Steht der Ladewunsch auf dem Aus-Wert, setzt für die betreffende Wechselbatterie auch nicht der Ladeprozess ein. Erst nach dem Aktivieren des Ladewunsches durch das EMS mit dem An-Wert

wird der Ladeprozess durch das BMS gestartet. Diese externe Beeinflussung der Ladeprozesse wird als gesteuertes Laden bezeichnet.

Der Ladeprozess kann beispielsweise auch für den Fall unterbrochen werden, dass beim EMS zur Erbringung von positiver Regelenergie abgerufen wurde. Die Anzahl der Schalthandlungen ist jedoch limitiert, sodass sichergestellt ist, dass die Batterie in einem definierten Zeitfenster aufgeladen wird. Des Weiteren ist im BVS implementiert, dass bei einem Ausfall des EMS die Wechselbatterien immer direkt nach einem Wechselvorgang geladen werden, so dass das System stabil weiter arbeitet.

3.8.3 Testbett für die Ablaufplanausführung

Aufbauend auf dem Simulationsmodell wurde ein Testbett für die Ausführung von Ablaufplänen und die Verarbeitung von Abrufsignalen aufgesetzt. Dieses setzt sich aus einer Online-Simulationskomponente für den Containerterminalbetrieb (**LogSim**) nebst einem Emulator der Datenerfassung und Feldsteuerung durch das Batterien-Verwaltungs-System, dem Werkzeug der Ablaufplanausführung (**VisExec**) sowie einer Basisimplementierung eines VTN für OpenADR zusammen.

In diesem Testbett können Funktionalitäten des Werkzeugs der Ablaufplanausführung wie die Abrufe von Ladezustands- und Steuerungsinformationen vom **BVS**, der Abgleich zwischen geplanten und tatsächlichen Leistungs- und/oder Ladezustandswerten sowie die Kontrolle der Ladeprozesse im Lademanagement und die koordinierte Lastabsenkung/Lasterhöhung überprüft werden.

Die Ausführung von Ablaufplänen kann in diesem Testbett auf ein Vielfaches der Echtzeit beschleunigt werden und/oder zu einem bestimmten Einstiegszeitpunkt im Ablaufplan gesprungen werden. Außerdem ist es möglich, einen Ablaufplan unabhängig von seinem Geltungstag im Testbett zur Ausführung zu bringen und somit – insofern zu Testzwecken gewünscht – auch mehrfach zu durchlaufen.

3.9 Durchführung von Flottenversuchen mit gesteuertem Laden

3.9.1 Rollout Rechenzentrum

Die **Abbildung 70** gibt eine Übersicht über die Verteilung der unterschiedlichen Anwendungskomponenten und ihrer Informations- bzw. Bedienungsschnittstellen. Grundsätzlich sind die für den Flottenversuch für gesteuertes Laden benötigten Anwendungskomponenten in den Rechnerumgebungen bei der HHLA und bei VATTENFALL/CYBERGRID lokalisiert. Das im Laufe des BESIC-Projekts am CTA installierte Batterien-Verwaltungs-System (BVS) setzte diverse Administrationsarbeiten voraus. Da es eine zentrale Steuerungskomponente werden sollte, die somit hohe Relevanz für den sicheren 24-Stunden-Betrieb der B-AGV-Flotte haben sollte, wurde entschieden, das BVS als „produktionsrelevantes System“ einzustufen. Dieser Einstufung folgend wurden sowohl das BVS als auch die Werkzeuge zur Logistiksimulation, Marktpreisabruf, Ablaufplanung und Planausführung in Erweiterung des betrieblichen Energie-Management-Systems (EMS) in einer hochverfügbaren Rechnerumgebung in der Speicherstadt in Hamburg eingebracht. Dieses steht in Verbindung zu dem IT-Leitstand, mit welchem vor Ort eine operative Überwachung und Steuerung der Betriebsabläufe möglich ist. Es wurde dort je ein zusätzlicher virtueller Rechner aufgesetzt. Wie in **Abbildung 70** zu sehen ist, befinden sich die virtuellen Rechner für die Terminalbetriebssoftware (TOS), das Batterien-Verwaltungs-System (BVS) und die Erweiterung des EMS innerhalb der Rechenzentrums Umgebung in der Hamburger Speicherstadt. Die Rechner mit den Basiswerkzeugen des EMS, zum Beispiel für die Datensammlung beim internen Messstellenbetrieb, befinden sich dagegen auf dem Terminalgelände. Zwischen den Rechnern mit den Basiswerkzeugen des EMS und den virtuellen Rechnern mit den Erweiterungswerkzeugen des EMS, dem BVS und dem TOS sind allesamt innerhalb eines unternehmenseigenen Netzwerks der HHLA zugreifbar. Aus diesem Netzwerk heraus muss das Werkzeug für die energiewirtschaftliche Ablaufplanung die Marktdaten für den Strommarkt sowie für den Minutenreservemarkt abrufen können. Der Zugriff von Webseiten aus dem Internet ist grundsätzlich nur über einen HTTP-Proxy möglich; es wurden entsprechende Richtlinien eingestellt, um den Webseitenabruf von verschiedenen Transparenzplattformen unter den Domänen `epexspot.com` oder `regelleistung.net` zu ermöglichen. In der Rechnerumgebung von VATTENFALL/CYBERGRID wurde ein Demosystem zur Verfügung gestellt, das die Vermarktungsprozesse der betrieblichen Flexibilität aus dem Containerterminalbetrieb in einem Pool mit der ihnen angestammten Flexibilität anderer Anlagen nachempfunden. Das Demand Response System (DRS) ist über eine OpenADR Nachrichtenschnittstelle mit dem EMS des Containerterminalbetriebs verbunden. Der VEN in der Rechnerumgebung der HHLA wie auch der VTN in der Rechnerumgebung von VATTENFALL/CYBERGRID müssen mit dem XMPP-Server kommunizieren können, über welchen die OpenADR-Nachrichten ausgetauscht werden. Der XMPP-Server wurde selbst in der Rechnerumgebung von VATTENFALL/CYBERGRID bereitgestellt, weshalb eine Zusammenschaltung der beiden Rechnernetze mit VPN-Technik notwendig war.

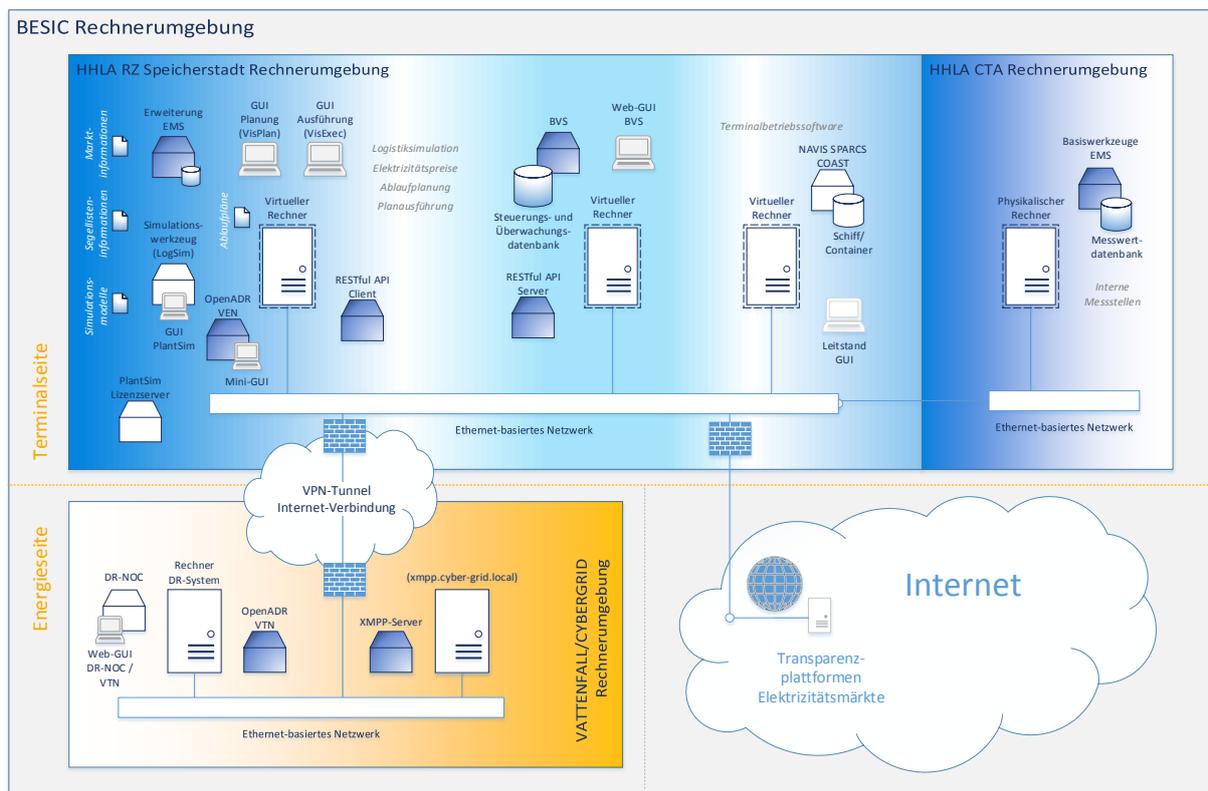


Abbildung 70: Übersicht über die beteiligten Anwendungskomponenten und deren infrastrukturtechnischen Zugehörigkeit.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Simulation des Logistikgeschehens der kommenden Stunden war der Informationsauszug zu der sogenannten Segelliste und den voraussichtlichen Anzahlen zu bewegender Container auf der Seeseite. Obwohl die Ankünfte und die Abfertigung von Containerschiffen wochen- und tageweise vorab bezüglich der Schiffsliegeplätze, der Zuordnung von Containerbrücken und so weiter geplant werden, mussten zur rechten Zeit im Vorlauf zur energiewirtschaftlichen Ablaufplanung entsprechende Informationen aus NAVIS SPARCS / COAST an das Simulationswerkzeug LogSim bereitgestellt werden.

In **Abbildung 71** wird nochmals verdeutlicht, wie die Ablaufplanerstellung und die Ausführung von Ablaufplänen zeitlich ineinandergreifen. Die Erstellung eines energiewirtschaftlichen Ablaufplans wird einen Tag im Voraus angestoßen. Gemäß der oben näher beschriebenen Geschäfts-/Anwendungsfälle empfiehlt es sich, die Ablaufplanerstellung täglich um etwa 08:00 Uhr durchzuführen. Denn die Angebotsfrist in den Tagesausschreibungen für Minutenreserve endet um 10:00 Uhr des jeweiligen Tages. Somit erfolgt die Ablaufplanerstellung mit einem Vorhersagehorizont von etwa 40 Stunden; der Planungszeitraum reicht von 00:00 Uhr bis 24:00 Uhr des darauffolgenden Tages. Die Markträumungspreise für Stundenkontrakte aus dem Vortagshandel an der Strombörse werden um 12:00 Uhr dieses Tages ermittelt und können nicht in höchster Aktualität der Dinge berücksichtigt werden. Stattdessen kann eine einfache Preisprognose auf Basis der Marktergebnisse des vorigen Tages oder der vorigen Woche verwendet werden.

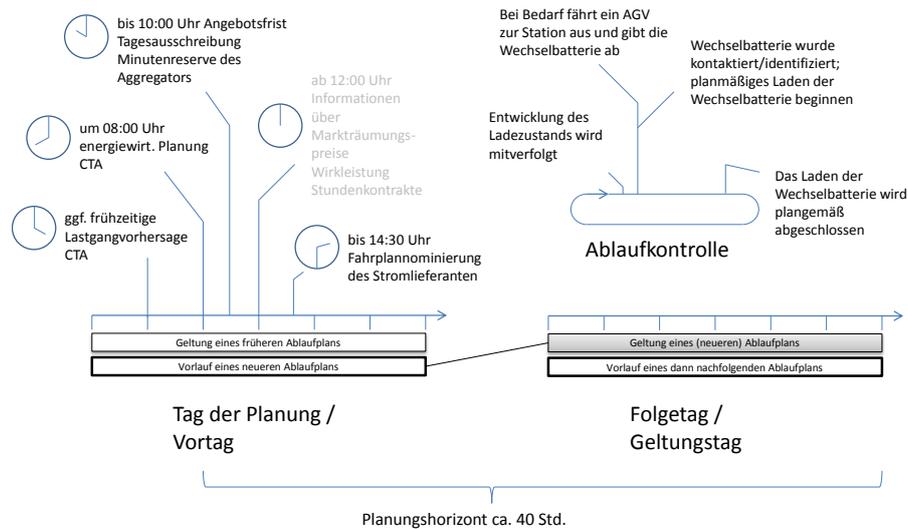


Abbildung 71: Ineinandergreifen der energiewirtschaftlichen Ablaufplanung Tags voraus und der Ausführung eines Ablaufplans an seinem Geltungstag

Im Übergang vom Tag der Planung auf den Folgetag wird mit der Ausführung des Ablaufplans begonnen. Über die gesamte Zeit der Ablaufplanausführung werden die Zustandsinformationen über die Wechselbatterien und die Ladegeräteeinheiten mitverfolgt. Dabei ist wichtig zu betonen, dass das Werkzeug der Ablaufplanausführung aus EMS (so bezeichnetes Teilsystem 2 des betrieblichen Energie-Management-Systems) sich bezüglich der Ladestandsentwicklung und der Belegung von Ladestellen in der Station passiv verhält; es bleibt dem BVS überlassen, den Bedarf für einen Batteriewechsel festzustellen und eine Ausfahrt eines B-AGV zur Station anzuordnen. Sodann durch ein B-AGV eine Wechselbatterie an die Station abgegeben und an einer bestimmten Ladestelle kontaktiert worden ist, wird dies vom EMS anhand der veränderten Zustandsinformationen für die Ladegeräteeinheiten (andere Wechselbatterie angeschlossen) nachvollzogen und die abgegebene Wechselbatterie als in der Station befindlich registriert. In der Folge werden die Steuerungsinformationen – genau genommen der An/Aus-Wunsch – vom EMS an das BVS so eingestellt, dass das Laden der betreffenden Wechselbatterie gerade so verläuft wie es ursprünglich geplant gewesen ist oder wie vorgesehen durch Abrufereignisse umgestellt worden ist.

3.9.2 Systematisierung Testphasen gesteuertes Laden

Die Flottenversuchsreihe des gesteuerten Ladens wurde in zwei Phasen aufgeteilt, um einerseits typische Situationen des Marktgeschehens nachzustellen und andererseits die Stabilität/Verfügbarkeit der im BESIC-Projekt entwickelten Anwendungsumgebung für eine reale Marktteilnahme zu prüfen.

Für eine effektive Durchführung dieser spezielleren Flottenversuche ähnlich der oben beschriebenen generellen Flottenversuche wurde ein Testkonzept entwickelt, das die Organisation, Abläufe und Dokumentation bei der Versuchsdurchführung beschreibt und das Zusammenwirken der Projektpartner regelt.

In der ersten Versuchsphase sollen die Funktionalitäten des im Projekt BESIC erweiterten betrieblichen Energie-Management-Systems (die Erweiterungskomponenten werden mit der Bezeichnung Teilsystem 2, kurz EMS umrissen) und der weiterentwickelten Aggregationsplattform (diese liegt HHLA-extern und wird mit der Bezeichnung Teilsystem DRS umrissen) untersucht werden. Dabei soll die Anwendungsumgebung für gesteuertes Laden definierten Abrufsituationen ausgesetzt werden, die einer Präqualifizierung für die Teilnahme an Tagesausschreibungen des Minutenreservemarktes gleichkommen. Die Anbindung an einen externen Markt wird durch ein nicht-kommerzielles Demo-System (Produktivsystem ohne aktive Energiemarktschnittstellen) bei VAT-

TENFALL realisiert, das die Machbarkeit zur Nutzung der Flexibilität ohne Beeinträchtigung der logistischen Abläufe im Terminal untersucht. In einer zweiten Versuchsphase soll die Anwendungsumgebung einer Marktperiode über einige Wochen ausgesetzt werden. Die Ergebnisse der sich selbst überlassenen Anwendungsumgebung und ihrer automatisierten Planungs-, Vermarktungs- und Planausführungsprozesse werden protokolliert und in Bezug auf ihre Alltagstauglichkeit für den Containerterminalbetrieb und den Betrieb eines virtuellen Kraftwerks beurteilt.

Der Beginn dieser speziellen Flottenversuchsreihe erforderte zudem einen hohen Abstimmungsaufwand zwischen den Projektpartnern um einerseits den reibungslosen Betrieb mit den versuchsweise eingesetzten batterie-elektrischen Fahrzeuge zu gewährleisten und andererseits Quereinflüsse/Störungen auf den Betrieb der übrigen Fahrzeuge zu vermeiden. Durch tagaktuelle Beobachtung und operationelle Abstimmung musste vermieden werden, dass Ladeprozesse allzu lange unterbunden und somit eine unzureichende Anzahl von Wechselbatterien zur Verfügung stehen. Gerade zu Beginn fehlte es bei den Werkzeugen zur Vorhersage der Transportlast noch an Feinjustierungen. Während der Flottenversuchsreihe zum gesteuerten Laden konnten praktische Erkenntnisse zum tatsächlichen Umschlagsgeschehen/Systemverhalten in die Vorhersagewerkzeuge einfließen.

Die Ergebnisse der ersten Versuchsphase zeigten, dass die Güte der Vorhersage von Transportlast für den nächsten Tag eine zentrale Bedeutung hat. Es konnten bei zunehmend komplexeren Abrufsituationen nur unter Vorhalt positive Versuchsergebnisse erzielt werden. Nach einzelnen konzeptionellen planerischen Verbesserungen und Justierung von Grundannahmen der Ablaufplanung über die maximale Ladeleistung, etc. stellte sich eine höhere Erfolgsquote ein. Eine teilweise Einschränkung für die Anwendung an Regelenergiemärkten stellt die Tatsache dar, dass die Flexibilitätsprognose nur für einen Tag im Voraus erstellt werden kann. Dadurch ist es aktuell nicht möglich, MRL über das Wochenende oder mehrere Feiertage zu vermarkten. Da der Trend an den Märkten für Regelreserven hin zu kürzeren Vermarktungsintervallen und Vorlaufzeiten geht¹¹, sollte dieser Nachteil zunehmend an Bedeutung verlieren.

Im Testmanagement wird der Testprozess mit den unterschiedlichen Aktivitäten, deren Beziehungen und entsprechender Dokumentation mit ihrer Verwendung bei der Testdurchführung beschrieben. Wie der **Abbildung 72** zu entnehmen ist, setzt sich Testdokumentation dem „Storyboard“, der „Testfallübersicht“ und den einzelnen „Prüfprotokollen“ mit den detaillierten Testfallbeschreibungen zusammen.

Ein „Storyboard“ regelt wie bestimmte Testfälle innerhalb der ersten Versuchsphase bei den Flottenversuchen mit gesteuertem Laden in Angriff genommen werden können. Es ist so etwas wie ein Testdrehbuch mit einzelnen Testtagen, an denen Testfälle wiederholt mit definierten Ausgangssituationen bezüglich der Höhe der vermarkteten Zuschalt- und/oder Abschaltpotenziale und/oder das Auftreten eines Regelenergiebedarfs) aufgegriffen werden und somit eine Bewertung der Testfälle ermöglicht. Die Testfälle sind in einer „Testfallübersicht“ mit ihrem Untersuchungshorizont und den Verantwortlichen aufgelistet. In diesem Verbundprojekt sind verschiedene Unternehmen zeitgleich an der Ausführung der Testfälle beteiligt, so dass ein Verantwortlicher aus

¹¹ Vgl. das aktuelle Festlegungsverfahren zur Weiterentwicklung der Ausschreibungsbedingungen und Veröffentlichungspflichten für Sekundärregelung und Minutenreserve der BNetzA

den Unternehmen pro Testfall die Durchführung des Tests koordiniert. Das „Prüfprotokoll“ mit der detaillierten Testbeschreibung und den Akzeptanzkriterien dokumentiert den Testverlauf und das Ergebnis.

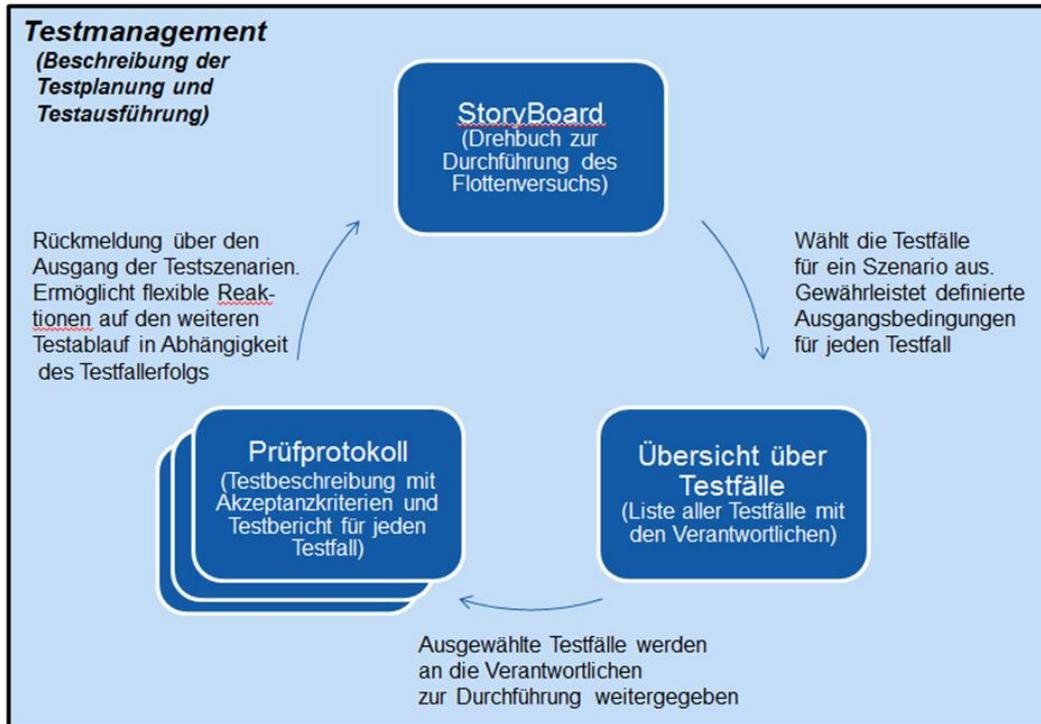


Abbildung 72: Darstellung der Beziehungen der Testdokumente

In der „Testfallübersicht“ sind alle Testfälle zu den Integrations- und Systemtests als auch den späteren Flottenversuch aufgelistet und entsprechend strukturiert worden.

Wie Tabelle 10 ersichtlich, ließen sich die Testfälle zum Planungs-/Vermarktungsprozess zum Beispiel danach differenzieren, ob Zuschalt- oder Abschaltpotenzial vermarktet wird, das Potenzial zeitunvollständig mit anderen Anlagen aus dem Pool vermarktet wird, etc.

Tabelle 10: Auszug aus der Testfallübersicht für die Ablaufplanungs- und Vermarktung

Anwendungsfall		Planung: Parameter								
		Angebot				Vermarktung				
Prüfnummer	Kurzbeschreibung	Übermittlung Baseline	Angebot für eine einzelne Produktperiode	Angebot für mehrere aufeinanderfolgende Produktperioden	Angebot für mehrere separate Produktperioden	Vermarktung Zuschaltpotential	Vermarktung Abschaltpotential	Vollständige Vermarktung	Zeitunvollständig	Teilweise Vermarktung
		008	Vollständige Vermarktung Abschaltpotential	●	●				●	●
011	Vermarktung eines Teils der angebotenen Leistung, Abschaltpotential	●	●				●			●
012	Vollständige Vermarktung, Zuschaltpotential	●	●			●				
013	Vermarktung eines Teils der angebotenen Leistung, Zuschaltpotential	●	●			●				●
014	Zeitunvollständige Vermarktung, Zuschaltpotential	●	●				●	●	●	
015	Vollständige Vermarktung für mehrere Produktperioden, Abschaltpotential	●		●			●	●		
016	Zeitunvollständige Vermarktung eines Teils der angebot. Leistung, Abschaltpotential	●		●			●		●	●
017	Vermarktung für mehrere separate Produktperioden, Abschaltpotential	●			●	●		●		
018	Vermarktung für mehrere Produktperioden mit entweder Zu- oder Abschaltung	●		●		●	●	●		

In Tabelle 11 wird dargestellt, dass sich die Testfälle zur Planausführung beispielsweise nach der Signalisierung der Abrufereignisse, der Regelrichtung und dem zeitlichen Zusammenhang eines Abrufs differenzieren ließen.

Tabelle 11: Auszug aus der Testfallübersicht für die Planausführung

Anwendungsfall		Ausführung: Parameter												
		Vereinzeit (Standard)	gesammelt	vor Hälfte 15 Min. (Standard)	nach Hälfte 15 Minuten	Abschaltpotential	Zuschaltpotential	kleine Werte (Teilabruf)	maximale Werte (Stresstest)	verschiedene Werte (gestuft)	einmal 15 Min.	mehrere 15 Min.	bis 45 Min.	bis 240 Min.
Prüffallnummer	Kurzbeschreibung													
019	MRL-Standardabruf 15 Min	●		●		●			●		●			
020	MRL-Abruf nach Hälfte Viertelstunde, 15 Min	●			●	●			●		●			
021	MRL-Standardabruf mehrere 15 Min	●		●		●			●			●		
022	MRL-Standardabruf Teilleistung 15 Min	●		●		●		●			●			
023	MRL-Standardabruf zusammenhängende einzelne 15 Min	●		●			●		●			●		
024	MRL-Standardabruf zusammenhängende einzelne 15 Min, Teilleistung	●		●			●	●				●		
025	MRL-Standardabruf 15 Min, Aggregatorfkt.	●		●		●			●		●			
026	MRL-Standardabruf mehrere zusammenhängende Zeitscheiben	●		●		●				●			●	●
027	MRL-Standardabruf mehrere zusammenhängende Zeitscheiben	●		●		●		●		●			●	●
028	MRL-Standardabruf 15 Min, mehrere Zeitscheiben, Zuschaltpotential	●		●			●			●			●	
029	MRL-Standardabruf 15 Min, mehrere Zeitscheiben, Zu- und Abschaltpotential	●		●		●	●		●				●	

Bei der Vorbereitung und Durchführung der Flottenversuche für gesteuertes Laden wurden die in **Abbildung 73** dargestellten Testphasen durchlaufen.

Zu Beginn wurden Funktionalitäten und Schnittstellen einzelner Komponenten der Werkzeuge zur Erstellung eines energiewirtschaftlichen Ablaufs und so weiter sich getestet. In der Phase der Funktionstests wurde beispielsweise die Schnittstelle zwischen dem BVS und dem EMS sehr ausgiebig im Hinblick auf den Abruf von Zustandsinformationen zu Ladegeräteeinheiten und Wechselbatterien sowie den Übertrag von Steuerungsinformationen hin zur Station für sich überprüft.

Bald darauf wurden Testfälle definiert, bei denen der technische Durchstich ausprobiert wurde. Es wurde die ganze Ablaufplanung und Vermarktung mit der Bedienung einer kompletten Kette von Werkzeugkomponenten getestet. Dies ist zum Beispiel die Erstellung eines Ablaufplans mit einem zum Zwecke eines Angebots von Minutenreserve blockiertem Abschaltpotential, welches vollständig durch den Aggregator vermarktet wird. In der Phase der Integrationstests wurden diese Testfälle gegenüber einer Testfeldumgebung (unter anderem mit Emu-

lationskomponenten aus der virtuellen Gesamtsystemumgebung) ausgeübt.

Nach dem Ausrollen der Werkzeugkomponenten auf den Rechnern vor Ort im Containerterminalbetrieb konnten die gleichen Testfälle an der Produktivsystemumgebung durchexerziert werden. Schließlich wurden Testfälle hinsichtlich der Vermarktung und dem Regelenergieabruf mit dem Storyboard in der Weise miteinander verknüpft, dass ein durchgängiger Testbetrieb mit vorgegaukeltem Marktumfeld und künstlich von außen herbeigeführten Aktivierungen/Deaktivierungen zur Erbringung von Regelenergie möglich war.

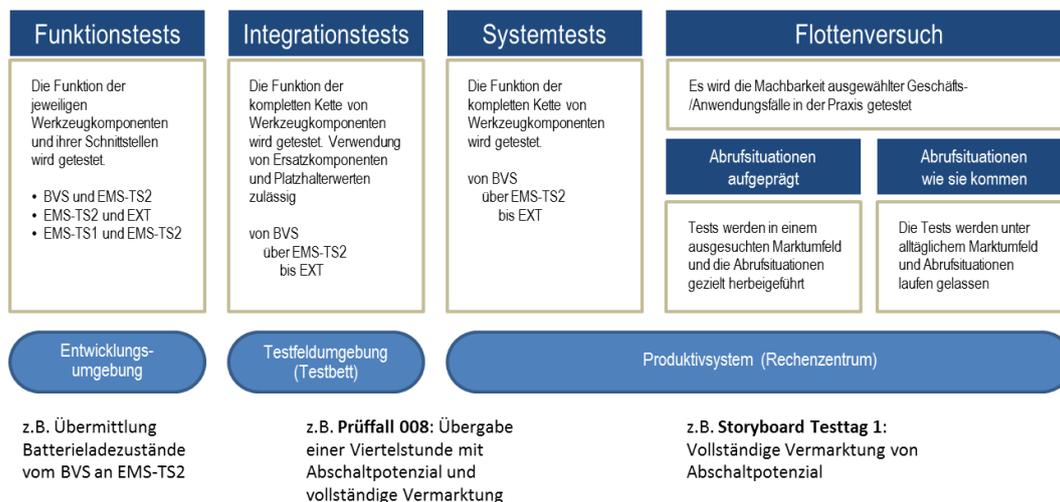


Abbildung 73: Verschiedene Testphasen zur Vorbereitung und Durchführung des Flottenversuchs für gesteuertes Laden

Das Storyboard umfasst eine zeitliche und inhaltliche Gliederung der abzuarbeitenden Prüffälle einschließlich zugehöriger Verantwortlichkeit. Die Prüffallnummer, Funktion und Fragestellung beschreiben die zu untersuchenden Fallbetrachtungen.

3.9.3 Abrufsituationen und Testergebnisse

Die Batterieladestation des Containerterminalbetriebs wurde zusammen mit anderen Anlagen von Großgewerbe- und Industriekunden von VATTENFALL in einem Demo-System gegenüber dem simulierten Marktumfeld betrieben. Die Abbildung 74 zeigt einen Auszug aus der Ressourcenliste des DR-NOC aus dem Teilsystem EXT, hinter der sich Stammdaten real existierender Anlagen und den virtuell vervielfältigten Anlagen verbergen. Die Ressourcen wurden auf der Basis der Praxiserfahrungen von VATTENFALL angelegt und stehen für ein realitätsnahes Entnahme- bzw. Einspeiseprofil sowie Schaltverhalten der Anlagen. Die angezeigten Liegenschaften („Facilities“) haben oftmals noch mehrere untergeordnete unabhängig schaltbare Verbraucher („Devices“), wie beispielsweise zwei getrennte Elektrolyseure in der Wasserstofftankstelle oder zwei Kältemaschinen und fünf Gebläsegruppen in einem Einkaufszentrum.

Resource facility name	Resource account	Resource pool	Region	Power	Capacity	Type
BESIC+	Vattenfall IT	MRL+	Hamburg	5.0 MW	MW	Consumer
BESIC-	Vattenfall IT	MRL-	Hamburg	5.0 MW	MW	Consumer
Electrolyser (Simulation)	cyberGRID GmbH	MRL+	Hamburg	3.0 MW	1.1 MW	Consumer
Gas engine (Simulation)	cyberGRID GmbH	MRL-	Hamburg	0.6 MW	0.6 MW	Generator
HHLA Terminal metering	Vattenfall IT	VPP+	Hamburg	5.0 MW	0.001 MW	Consumer
Industrial CHP (Simulation)	cyberGRID GmbH	MRL-	Hamburg	11.0 MW	4.92 MW	Generator
Pooled Shopping Malls (Simulation)	cyberGRID GmbH	MRL+	Hamburg	14.0 MW	4.92 MW	Consumer
PxC Metering (total)	PxC	MRL+	Hamburg	5.0 MW	0.6 MW	Consumer
PxC Test (Pulses)	cyberGRID GmbH	Test MRL+	Amprion Grid Area	0.6 MW	0.6 MW	Consumer
V002-01	0002	ACDC1+	Hamburg	4.12 MW	0.14 MW	Consumer
V003-01	0003	ACDC1+	Hamburg	0.576 MW	0.085 MW	Consumer
V007-01	0007	ACDC1+	Hamburg	1.311 MW	0.14 MW	Consumer
V012-01	0012	MRL+	Hamburg	0.85 MW	0.4 MW	Consumer
V012-01n	0012	MRL-	Hamburg	0.85 MW	0.7 MW	Consumer
V012-NE	0012	VPP+	Hamburg	5.0 MW	0.1 MW	Consumer
V015-01	0015	ACDC1+	Hamburg	1.413 MW	0.14 MW	Consumer
V015-01n	0015	ACDC1-	Hamburg	1.413 MW	0.365 MW	Consumer

Abbildung 74: Verwaltung von Stammdaten der Anlagen im Pool beim Teilsystem EXT

Im Folgenden wird auf drei Testfälle näher eingegangen, die eine Zweitnutzung der Wechselbatterien im mit Teilnahme am Minutenreservemarkt beurteilen lassen. Es ging jeweils am Vortag ein Flexibilitätsangebot seitens des EMS sowie eine Gebotserstellung für den gesamten Anlagenpool durch das Teilsystem DRS voraus; dieses wurde in separaten Prüfprotokollen festgehalten, welche der Einfachheit halber nicht dargestellt werden. Die Zusammenstellung eines gemeinsamen Minutenreserveangebots aus der im Teilsystem DRS angegebenen Flexibilität einzelner Anlagen ist allerdings nicht unwesentlich für den Gesamterfolg. In der zweiten Versuchsphase wurde darum geschaut, ob die Flexibilität der Batterieladestation besser im zeitlichen Zusammenhang von Vierstundenblöcken oder Zweistundenblöcken verwertet werden kann. Innerhalb des Vermarktungsprozesses wird versucht, die von der Ressource bis zu einer halben Stunde vor Ende der Angebotsabgabefrist angegebene Flexibilität, welche von den Betriebsabläufen in Containerterminal bestimmt wurde, mindestens zu den gemeldeten Preisen in einer simulierten Tagesausschreibung erfolgreich anzubieten.

Es wurden aus dem Jahr 2014 vergangene Tage ausgesucht, an denen der im jeweiligen Prüfprotokoll beschriebene Regelenergiebedarf (siehe „Erwartetes Verhalten“) eingetreten war. Ein akzeptiertes Angebot wurde nur dann abgerufen, wenn der bei der Flexibilitätsangabe vorgegebene Arbeitspreis kleiner oder gleich dem Grenzpreisarbeitspreis in der entsprechenden Viertelstunde war (siehe „Beobachtetes Verhalten“).

Die Testfälle spiegeln daher sowohl hinsichtlich des Marktumfelds (Grenzleistungspreis für die Angebotszuschläge) für die Vermarktung als auch hinsichtlich der Abrufsituationen (Arbeitspreis, Aktivierungs-/Deaktivierungszeitpunkte, Benachrichtigungszeiten) eine reale Situation aus 2014 wider. Durch die beschriebene Vorgehens-

weise wurde sichergestellt, dass alle Prüfungsschritte einer Teilnahme am MRL-Markt realitätsgetreu abgebildet wurden.

Bei der Auswertung der Prüfprotokolle wurde das tatsächliche Leistungsaufnahmeverhalten der Batterieladestation mit den Anforderungen des Abrufs verglichen, um darüber zu befinden, ob dieses nachweistauglich ist.

Gleichzeitig wurden im BESIC-Projekt die folgenden Kommunikationsfunktionalitäten erfolgreich umgesetzt und getestet:

- Übertragung von Leistungsaufnahmewerten vom VEN an den VTN (in unterschiedlichen Zeitintervallen zwischen 1 Sekunde und 15 Minuten)
- Angaben zu Flexibilität vom VEN beim VTN (täglich wiederkehrend, einschließlich Lastgangvoranmeldung, Mindestpreise für Vermarktung)
- Rückmeldung über die erfolgte Vermarktung vom VTN an den VEN (am Pay-as-Bid Markt erfolgreich platzierte Minutenreserveleistung und Gebotspreise mit Zuschlag)
- Meldungen über die generelle Verfügbarkeit des VEN an den VTN (Opt-In, Opt-Out)
- Übermittlung von Schaltanforderungen vom VTN an den VEN sowie deren situative Bestätigung (Opt-Status) und Verarbeitung durch den VEN

Prüfprotokoll 19

Gemäß Testfall Nr. 19 wurde ausgetestet, ob per Abruf in der ersten Hälfte einer vorausgehenden Viertelstunde ein vollständig vermarktetes Abschaltpotential für die Dauer von einer Viertelstunde abgerufen werden kann. Es wird bei diesem Testfall also das Abschaltpotential einer bestimmten Viertelstunde vereinzelt abgerufen. Außerdem ist in der Abrufsituation gefordert, bis zum Maximalwert der angegebenen Flexibilität zu gehen – das Abschaltpotential also vollends auszuschöpfen.

Die **Abbildung 75** zeigt ein Liniendiagramm mit den Leistungswerten, wie sie im Verlauf des Tests durch die Abrufsituation erfordert wurden und wie sie sich tatsächlich durch die Schalthandlungen in der Station ergeben haben. Die weiße Linie markiert, wie hoch die Stromnachfrage in der Station für die jeweilige Viertelstunde am Vortag geplant/eingeschätzt worden war (Basislinie). In der Viertelstunde von 16:15 Uhr bis 16:30 Uhr war eine Stromnachfrage mit einer durchschnittlichen Leistung von 360 kW geplant gewesen. In den drei Viertelstunden ab 16:30 Uhr bis 17:15 Uhr war mit einer durchschnittlichen Leistung von 420 kW eine höhere Stromnachfrage vorgesehen gewesen. Und so weiter mit einer durchschnittlichen Leistung von 360 kW in der Viertelstunde von 17:15 Uhr bis 17:30 Uhr. Die Stromnachfrage verläuft laut Plan also mit einem kurzen Hochstück. Die graue Linie zeigt an, bis zu welcher Leistung eine Lastabsenkung maximal getrieben werden kann. Die Differenz zwischen der weißen und der grauen Linie entspricht also einem Band von etwa 220 kW, was so viel ist wie das angegebene Abschaltpotential. Die blaue Linie zeigt die durch die Abrufsituation geforderte Anlagenfahrweise; im dargestellten Zeitabschnitt verläuft sie bis auf die Viertelstunde von 16:45 Uhr bis 17:00 Uhr deckungsgleich mit der weißen Linie. Es richtet sich hier ein Abruf an den Containerterminalbetrieb, um 16:45 Uhr die Erbringung positiver Regenergie zu aktivieren, mit einer Durchschnittsleistung von ca. 180 kW aufrecht zu halten und um 17:00 Uhr zu deaktivieren. Allem gegenüber zeigt die grüne Linie den tatsächlichen Verlauf der Gesamtleistungsaufnahme der Batterieladestation.

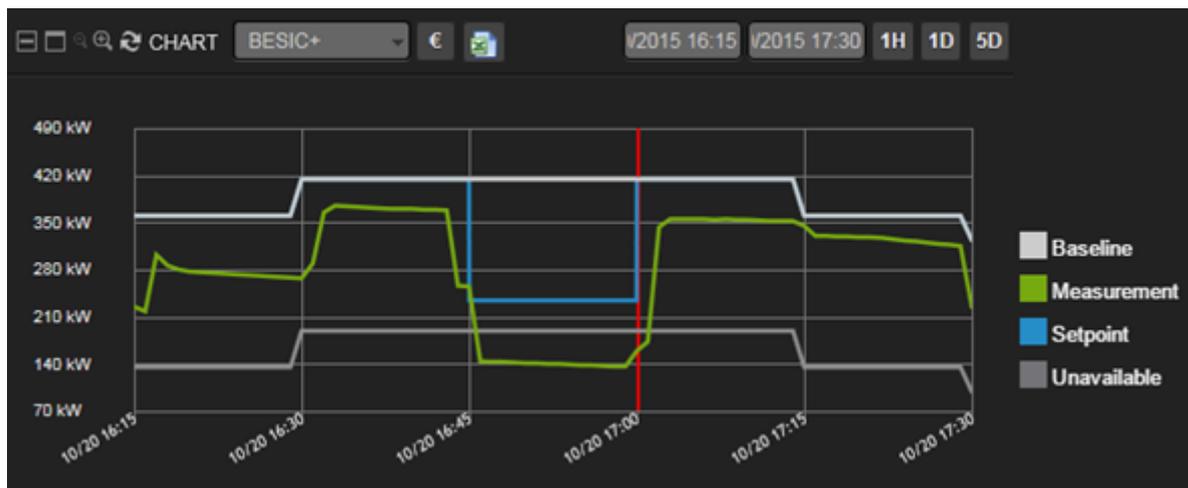


Abbildung 75: Aufzeichnungen für das Prüfprotokoll zu Testfall Nummer 19

Die Anforderungen des ÜNB für einen regulären Leistungsabruf wurden eingehalten, so dass der Versuch als erfolgreich bewertet wurde. Es ist zu erkennen, dass ausgehend von einer Leistungsaufnahme in Höhe von ungefähr 360 kW gegen 16:40 Uhr bis zum Aktivierungszeitpunkt 16:45 Uhr in zwei Stufen auf eine Leistungsaufnahme von 140 kW abgesenkt wurde. Jede der Stufe bedeutet hier eine Abschaltung bei einer Ladestelle, was zur damaligen Zeit einen Leistungsabfall um 110 kW ausmachte. Gerade rechtzeitig wurde damit zu Beginn der Viertelstunde um 16:45 Uhr die geforderte Schwelle von 240 kW unterschritten. Über die Viertelstunde des Abrufs hinweg war die Leistungsaufnahme sehr gleichmäßig. Zum Ende der Viertelstunde um 17:00 Uhr geht die Leistungsaufnahme beinahe in einem Zug wieder auf das Ursprungsniveau von etwas unter 360 kW zurück. Die Leistungsaufnahme muss innerhalb der ersten Hälfte der nachfolgenden Viertelstunde wieder vollständig zurückgeführt sein.

Außerdem wurde festgehalten, dass die am Vortag ergangene Vermarktung erfolgreich war und im Übergang zur Ausführung des seither vorliegenden energiewirtschaftlichen Ablaufplans um Mitternacht eine Opt-In-Meldung (Anlagenverfügbarkeit) erging. Der auf dem OpenADR-Standard basierende Kommunikationsweg funktionierte einwandfrei; es gab eine durchgehende Messwertübermittlung im gesamten untersuchten Vorhaltezeitraum und darüber hinaus. Als Reaktion auf die Mitteilung des Abrufereignisses, wurde die Bereitschaft für die Schaltung bzw. Teilnahme im Abrufereignis über eine Opt-In-Meldung nochmals angezeigt. Das (projektintern definierte) Toleranzband von 80-130 % um den mit Abrufereignissen geforderten Leistungsaufnahmeverlauf wurde eingehalten. Ebenfalls wurde die Dauer der Abschaltung mit einer vereinzelt Viertelstunde eingehalten. Davon abgesehen, stellte es sich heraus, dass die Leistungsaufnahme tatsächlich abweichend von der Basislinie verläuft und die Umschaltstufen etwas großzügig sind.

Angesichts der Auswertungsergebnisse wurde die Anwendung zweier unterschiedlicher Berechnungsmethoden für den Nachweis einer Regelenergieerbringung diskutiert: Zur Ermittlung der tatsächlich gelieferten Regelenergie muss in dem Zeitraum zwischen Aktivierungs- und Deaktivierungszeitpunkt die Differenz zwischen dem Messwert und einem Bezugswert für die Leistungsaufnahme in der Station gebildet werden. Dieser Bezugswert geht auf den zu Verbrauchswert zurück, der zu erwarten ist, so denn keine Schaltung durchgeführt wird. Es ist von hoher Bedeutung, dass die Bezugswerte den Leistungsverlauf ohne Steuerungseingriffe mit möglichst geringem Fehler beschreiben und zugleich ein hohes Maß an Transparenz in der Ermittlung gewahrt wird. Bei der in Deutschland gebräuchlichen Berechnungsmethode wird der Leistungsmittelwert des im Rahmen einer Lastgangvoranmeldung angegebenen Viertelstundenverbrauchswerts als Bezugswert verwendet. Diese geschätzten Ver-

brauchswerte werden zusammen mit der Flexibilität Tags voraus vom EMS an das Teilsystem DRS übermittelt. In Österreich wird dagegen eine Berechnungsmethode verwendet, nach welcher der beim Empfang des Abrufsignals vom ÜNB gemessene Leistungsaufnahmewert in konstanter Fortschreibung über den Zeitraum zwischen Aktivierungs- und Deaktivierungszeitpunkt als Bezugswert geltend gemacht wird. Eine weitere Berechnungsmethode bestünde darin, den Leistungsmittelwert des Tags voraus für den Moment des Abrufsignalempfangs geschätzten Verbrauchswerts in konstanter Fortschreibung heranzuziehen. Die Testauswertung machte deutlich, wie wichtig es ist, die Verbrauchswerte am Vortag möglichst zutreffend einschätzen/planen zu können.

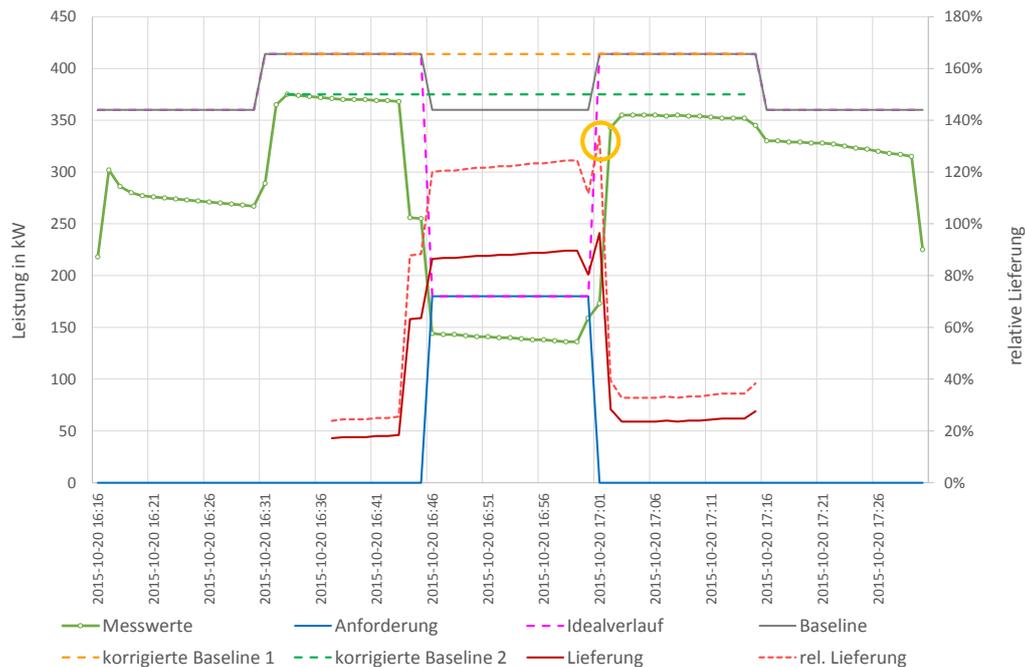


Abbildung 76: Auswertung für den Prüffall Nr. 19 mit unterschiedlichen Berechnungsmethoden für die Bezugswerte

In **Abbildung 76** wird die Auswertung des Schaltversuchs basierend auf unterschiedlichen Methoden zur Definition der Baseline dargestellt. Es gilt hier zu beachten, dass der für 16:46 Uhr eingezeichnete Leistungswert beispielsweise den Mittelwert des Zeitabschnitts 16:45:00 bis 16:46:00 und somit den Beginn der Aktivierung repräsentiert. Gleiches gilt für alle anderen Datenwerte der dargestellten Zeitreihen. Die grüne Linie zeigt die Messwerte des Stromverbrauchs, die regelmäßig vom EMS über den Kommunikationsweg mit OpenADR an die Aggregationsplattform im Teilsystem DRS gemeldet werden. Die blaue Linie verdeutlicht die von der Aggregationsplattform angeforderte Erbringung von Regelernergie. Die graue Linie zeigt den für die Batterieladestation geschätzten Leistungsaufnahmeverlauf, wie er am vorhergehenden Tag von EMS an das Teilsystem DRS gemeldet wurde (erste Berechnungsmethode). Die orange-gestrichelte Linie zeigt abweichend davon die Fortschreibung der Bezugswerte gemäß der zweiten Berechnungsmethode. Die grün-gestrichelte Linie stellt die Bezugswerte gemäß der dritten Methode dar. Im Idealfall sollte sich die Leistungsaufnahme vom Niveau der Bezugswerte ausgehend soweit verringern, bis die Differenz der angeforderten zu- oder abzuschaltenden Leistung (blaue Linie) entspricht. Dieser Idealverlauf wird durch die rosa-gestrichelte Linie veranschaulicht.

Die tatsächliche MRL-Lieferung wird aus der Differenz aus Baseline und realem Verbrauch ermittelt und ist in der **Abbildung 76** rot dargestellt. Der Relativwert der Lieferung (bezogen auf die Leistungsanforderung) ist rot-gestrichelt eingezeichnet. Es ist zu erkennen, dass eine deutliche Übererfüllung der Anforderung gegeben ist. Aus der **Abbildung 77** wird der Einfluss der Berechnungsmethode auf die Ermittlung der MRL-Lieferung deutlich ersichtlich. Bei Verwendung der ersten Methode wird während der Dauer der eigentlichen Lieferung die beste

Annäherung an die Leistungsanforderung erzielt. Dies geht vor allem darauf zurück, dass vorab bekannte Leistungsänderungen im geplanten Verbrauch hier berücksichtigt werden. Wenn sich aber die vorhergesagten Leistungssprünge nicht exakt mit dem realen Verhalten decken, kann infolge der Differenzbildung ein unstetiger Verlauf des errechneten Werts der Lieferung resultieren (z.B. von 16:59 bis 17:01). Die Methoden mit konstanter Wertfortschreibung weisen dieses Problem nicht auf. Die zweite Methode hat insbesondere den Vorteil, dass kein genereller Basisfehler (Nullpunktverschiebung) auftritt, da der Leistungswert zum Zeitpunkt des Empfangs des Abrufs (eingestellt war eine Vorlaufzeit von 14 min in DRS und 8 min an der Ressource BESIC+) eingefroren wird. In manchen ausländischen Strommärkten wäre eine Kombination der ersten und dritten Methode erlaubt; der vorab gemeldete oder berechnete Lastgang würde in diesem Fall zu Abrufbeginn auf den aktuellen Leistungswert (oder einen Mittelwert der vorhergehenden Minuten) verschoben werden, um den Basisfehler zu minimieren.

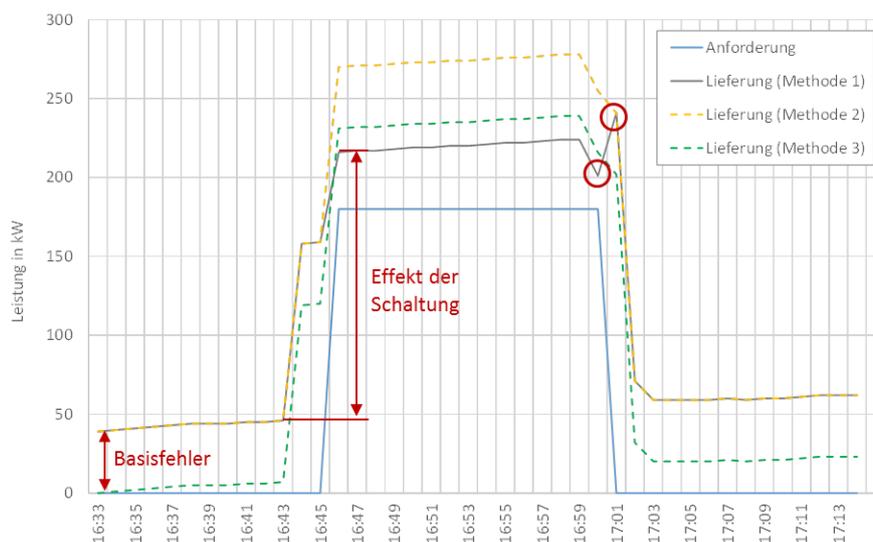


Abbildung 77: Vergleich unterschiedlicher Berechnungsmethoden anhand der jeweils errechneten MRL-Lieferung

Die hier betrachteten Kriterien für die Wahl der Baseline sind (mit abnehmender Bedeutung): Wert der berechneten Lieferung (am wichtigsten), Reaktion auf geplante Sprünge im Lastgang, Basisfehler, Effekt der eigentlichen Schalthandlung und stetiger Leistungsverlauf (an wenigsten wichtig). Im vorliegenden Beispiel schneidet die erste Methode in der Gesamtbetrachtung am besten ab; aufgrund der Berücksichtigung der Sprünge im Lastgang sind Lieferwert und Effekt der Schalthandlung näher am angeforderten Profil als bei den anderen beiden Methoden.

Es ist jedoch erforderlich, zusätzliche Testfälle zu untersuchen, um eine allgemeingültige Aussage für den Flexibilitätstyp der Batterieladestation treffen zu können. Da über mehrere Schaltversuche keine besser geeignete Methode identifiziert werden konnte, wurde im BESIC-Projekt die in der Planung berücksichtigte erste Berechnungsmethode weiterhin verwendet. Generell wird die Qualität des Ergebnisses von Methode 1 (und etwaigen darauf basierenden verbesserten Methoden) hauptsächlich von der Güte der Lastgangvorhersage beeinflusst. Im BESIC-Projekt wurde beschlossen, dass die Planung der Stromnachfrage nicht länger von der durchschnittlichen Ladeleistung eines fünf bis sechsständigen Ladevorgangs für ein Blei-Batteriesystem ausgehen sollte; besser konnte allein die auf die Konstantstromphase entfallende Stromnachfrage eingeschätzt werden.

Es bedarf weiterer Untersuchungen zur Entwicklung einer geeigneten Baseline-Methode. Denkbar wäre u.a. eine Korrektur durch Parallelverschiebung der tags zuvor gemeldeten Baseline für die Dauer des Abrufs, um sich an

die Differenz der Messwerte (Mittelwert in einem definierten Zeitraum vor dem Abruf, z.B. 5-15 min) möglichst gut anzunähern.

Die Problematik der gegenüber dem ÜNB abzurechnenden tatsächlich erbrachten Leistung bei Aktivierung kann hier nur exemplarisch diskutiert werden. Sie stellt aber zukünftig eine erhebliche grundsätzlich zu klärende Schwierigkeit dar. Beispielsweise akzeptiert der österreichische ÜNB Austrian Power Grid mindestens fünf verschiedene Methoden. Auch in Deutschland ist im Zuge des Weißbuchprozesses die Maßnahme 10, „Regeln für die Aggregation flexibler Stromverbraucher klären“ identifiziert.

3.9.3.1 Prüfprotokoll 24

Gemäß dem Testfall Nr. 24 wurde getestet, ob ein teilweise vermarktetes Zuschaltpotential für die Dauer vier zusammenhängender Viertelstunden abgerufen werden kann.

Es sollte ein Zuschaltpotential von zumindest 0,1 MW für das Minutenreserveprodukt NEG_08_12 vermarktet werden. Dieses Produkt konnte zwar bei der Testdurchführung nicht angegangen werden; jedoch war das Flexibilitätsangebot mit 0,324 MW bei der Erstellung eines Gebots für das Minutenreserveprodukt NEG_16_20 zuträglich. Tatsächlich wurde dann ein Zuschaltpotential von 0,108 MW der Batterieladestation für das Gebot berücksichtigt und mit dem Zuschlag versehen. Das erste Abrufsignal ging um 16:07 Uhr ein und setzte eine Regelenergieerbringung durch die Batterieladestation in Gang. Der Aktivierungszeitpunkt ist dann 16:15 Uhr, der Beginn der nachfolgenden Viertelstunde. In der Folge sollte dann diese Aktivierung durch anschließende Ereignissignale um 16:23 Uhr, 16:35 Uhr und 16:53 Uhr aufrechterhalten bleiben. Der Deaktivierungszeitpunkt ist dann 17:15 Uhr, das Ende der darauffolgenden Viertelstunde.

Die **Abbildung 6** zeigt die Bezugswerte als sogenannte Basislinie (weiße Linie), die tatsächlich gemessene Leistungsaufnahme der Batterieladestation (grüne Linie), die angeforderte Zuschaltleistung (blaue Linie) sowie die unumgängliche Verbrauchsleistung (graue Linie) im maßgeblichen Zeitabschnitt der Testdurchführung. Die Messwertkurve folgt über mehrere Viertelstunden exakt der Kurve der angeforderten Zuschaltleistung. Aber kurz vor Ende des Aktivierungszeitraums – in den letzten 10 Minuten – sinkt der Messwert für die Leistungsaufnahme ein wenig ein. Dies ist dadurch zu begründen, dass sich bei der zuletzt betroffenen Wechselbatterie im Ladevorgang ein Übergang von der Konstantstromphase in die Konstantspannungsphase bemerkbar macht. Um die Ladespannung konstant zu halten, wird der Ladestrom nach und nach zurückgefahren, was sich in einem bogenförmigen Leistungsabfall an dieser Ladestelle und schließlich der Gesamtleistungsaufnahme der Station äußert.

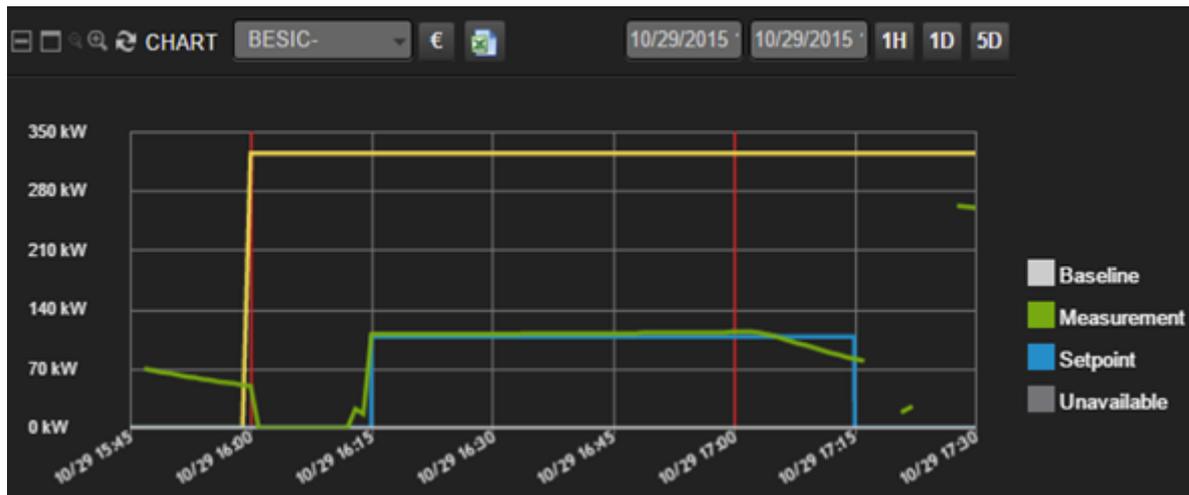


Abbildung 78: Aufzeichnungen für das Prüfprotokoll zu Testfall Nummer 24

Es wurden innerhalb der einen Stunde vier 15-minütige Abrufe ÜNB-konform kommuniziert, welche einen zusammenhängenden Zeitabschnitt von einer Stunde ergaben. Trotz des Leistungsabfalls gegen Ende des Aktivierungszeitraums wurde es als ein positives Testresultat aufgenommen. Für die Durchführung des Projekts wurde ein Leistungstoleranzband von 80-130% der angeforderten Leistung definiert. Es wurde in den letzten Minuten des vierten Abrufs nicht mehr eingehalten, da im Ladeprozess die Spannungsbegrenzung einsetzte. In der Praxis definieren ÜNB deutlich strengere Regeln insbesondere im Falle der Untererfüllung der Lieferung. Die Batterieladestation würde jedoch nicht alleine am Minutenreservemarkt angeboten werden, sondern wie bereits erwähnt als Teil eines Pools mit entsprechender Reservevorhaltung und Ausregelfähigkeit. Zudem tritt durch das Pooling von Kleinanlagen unterschiedlichen Typs in der Regel ein ausgleichender Effekt ein. Somit kann ein Aggregator auf der Ebene unabhängig schaltbarer Anlagen höhere Toleranzen akzeptieren als der ÜNB auf der Pool-Ebene.

Im Weiteren war im BESIC-Projekt die Ladestrombegrenzung für die einzelnen Ladestellen herabgesetzt worden, um die Konstantstromphase auszudehnen und die Konstantspannungsphase zu verkürzen. Dadurch sollte es möglich werden, einen vierstündigen Vorhaltungszeitraum durch Reservieren des Zuschalt- oder Abschaltpotenzials von bis zu zwei Wechselbatterien komplett abzudecken. Gleichsam konnte die Konstantspannungsphase planerisch vernachlässigt werden.

3.9.3.2 Prüfprotokoll 23

Gemäß dem Testfall Nr. 23 sollte ausgetestet werden, ob innerhalb einer Produktperiode zu unterschiedlichen Zeitabschnitten, das heißt mehrfach abgerufen werden kann.



Abbildung 79: Aufzeichnungen für das Prüfprotokoll zu Testfall Nummer 23

Innerhalb einer vierstündigen Produktperiode traten zwei Abrufe auf. Ein erster Abruf dauerte eine Viertelstunde lang von 16:00 Uhr bis 16:15 Uhr; der zweite Abruf dauerte vier Viertelstunden von 16:45 Uhr bis 17:45 Uhr. Die **Abbildung 79** zeigt die Verläufe der Bezugswerte (weiße Linie), der gemessene Summenleistung (grüne Linie), etc. auf der Pool-Ebene. Auf der Ebene der Ressource BESIC+ wurden per Abruf zwei Aktivierungen erfolgreich vorgenommen. Doch es zeigten sich Schwächen beim Wiedererreichen der Basislinie nach dem Deaktivierungszeitpunkt. Diese Schwächen zeigen allerdings auf Pool-Ebene keine signifikanten Auswirkungen, da die übrigen Ressourcen dieses ungünstige Verhalten ausgleichen konnten.

4 Untersuchung von Lebenszykluskosten verschiedener Batteriesysteme

4.1 Durchführung von Simulationsstudien zu Auslegungsfragen

Im Rahmen des BESIC-Projekts war ein Simulationsmodell für den Container Terminal Altenwerder (CTA) aufgebaut worden, so dass mit Hilfe von Parametern für die Anzahlen der Containerbrücken, der Fahrzeuge und der Wechselbatterien, etc. verschiedene Ausstattungsszenarios durchgespielt werden konnten. Außerdem können die Auswirkungen verschiedener Betriebsstrategien auf die Betriebskennzahlen des Containerterminalbetriebs wie beispielsweise die Abfertigungszeiten, den Gesamtenergieverbrauch, etc. studiert werden. Durch mehrmaliges Ausführen von Simulationsläufen können relative Häufigkeiten der betreffenden Datenwerte festgestellt und ein Erwartungswert berechnet werden.

4.1.1 Studie der Ausstattung mit Wechselbatterien

Für den unten näher beschriebenen Betriebskostenvergleich zwischen diesel-elektrischen und batterie-elektrischen Transportfahrzeugen wurde eine Simulationsstudie „Minimalausstattung“ durchgeführt. Es sollte die minimale Anzahl von Wechselbatterien gefunden werden, die erforderlich sein mag, um Transportfahrzeuge mit vernachlässigbaren Einbußen bei der Transportleistung im Fahrbetrieb zu halten. Dazu wurden mehrere Simulationsexperimente mit verschiedenen Ausstattungsszenarios durchgeführt. Es wurde die Anzahl der Transportfahrzeuge unverändert gelassen und die Anzahl Wechselbatterien im Pool ebenso wie die Anzahl der Ladestellen in der Station variiert. Die Steuerungselemente (Methodenbausteine des Simulationsmodells) wurden dem gegenwärtigen Stand der Automatisierung im CTA nachempfunden. Bei der Auswertung wurde neben der mittleren Wartezeit an der Batteriewechselstation die Transportleistung der Transportfahrzeuge betrachtet.

4.1.1.1 Experimentaufbau

Das Verhältnis der Anzahl von Ladestellen in der Station (inklusive einer Wechselbatterie extra) gegenüber der Anzahl der batterie-betriebenen Fahrzeuge in der Flotte wurde von 1:10 bis 10:10 schrittweise angehoben. Als Batterietypen wurden Blei-Batteriesysteme mit einer nominalen Ladungsträgerkapazität von 500 Ah verwendet, welche mit $\frac{1}{4}$ C geladen werden können. Das Simulationsmodell wurde so eingestellt, dass die Transportfahrzeuge zu einem Batteriewechsel an die Station beordert werden, sobald der Ladezustand ihrer Wechselbatterie 40 % der Nennspeicherkapazität von 360 kWh erreicht. Es wurde diesbezüglich angenommen, dass bei den Blei-Batteriesystemen ein Tiefentladeschutz greift, sobald sie unterhalb einen Stand von 20 % der Nennladungsträgerkapazität entladen werden. Grundsätzlich ist also in einem vollen Lade-/Entladezyklus eine Ladungsträgerkapazität in Höhe von 400 Ah beim Blei-Batteriesystem zugreifbar. Davon werden im Entladeteilzyklus für ein Blei-Batteriesystem im Simulationsmodell pauschal 100 Ah, also der Bereich von 20 % bis 40 % der Nennladungsträgerkapazität, aufgespart. Dadurch wird gewährleistet, dass ein batterie-betriebenes Transportfahrzeug anstehende Fahraufträge vollenden und sich anschließend an die Station begeben kann.

Die Simulationsexperimente wurden für eine aufsteigende Anzahl von batterie-betriebenen Fahrzeugen in der Flotte und zwei verschiedene Auslastungssituationen wiederholt. Es wurde nacheinander ein Anteil von 10, 40 und schließlich 80 B-AGV in einer Flotte von insgesamt 80 Fahrzeugen betrachtet.

Zum einen wurde anhand einer synthetischen Segelliste mit einer sehr hoch gewählten Anzahl eintreffender Schiffe und umzuschlagenden Containern das Terminal für den gesamten Betrachtungszeitraum auf der Seeseite maximal ausgelastet (Synmax). Da es unter höchstmöglicher Auslastung des Transportsystems unerheblich ist, ob Transportaufträge in der Flotte auf den Anteil der B-AGV oder den Anteil der E-AGV entfallen, wurden die E-AGV in den Simulationsexperimenten für die Auslastungssituation vernachlässigt.

Zum anderen wurde anhand einer Segelliste für die KW 53 aus dem Jahr 2013 das Terminal auf der Seeseite

praxisgetreu hoch ausgelastet. Trotzdem das Terminal grundsätzlich hoch ausgelastet ist, kann das Verhalten des Anteils der B-AGV vom Verhalten des Anteils der E-AGV in der Flotte beeinflusst werden. Denn das Transportsystem ist in dieser realistischen Auslastungssituation nicht gänzlich mit Transportaufträgen gesättigt – schnappt ein E-AGV einem B-AGV einen Transportauftrag weg, so steht nicht unverzüglich ein anderweitiger Transportauftrag für das B-AGV an.

Für sämtliche Experimentläufe wurde der Betrachtungszeitraum von einer Woche gewählt. Über diesen Zeitraum wurden die absolute Anzahl der durchgeführten Transporte, die Transportleistung pro Fahrzeug, Wartezeiten an der Ladestation und die Dauer des Fahrbetriebs aufgezeichnet.

4.1.1.2 Theoretische Überlegungen

Mit Blick auf die Lade-/Entladedauer lässt sich theoretisch aussagen, wie viele Ladestellen und gleichsam wie viele Wechselbatterien extra benötigt werden, um die Energie an eine Anzahl n von Fahrzeugen ohne Einschränkungen des Fahrbetriebs bereitstellen zu können.

Es sei für den Entladeteilzyklus in einer realistischen Auslastungssituation im Durchschnitt ein reiner Fahranteil von 30 % zugrunde gelegt. Bei einem durchschnittlichen Fahrverbrauch von etwa 76 Ah pro gefahrener Stunde ergibt sich ein durchschnittlicher Entladestrom von rund 23 A. Bei einem Blei-Batteriesystem mit nominaler Ladungsträgerkapazität von 500 Ah werden zum Schutz vor Tiefentladung und einer Energiereserve für die Zufahrt zur Batteriewechselstation etwa 200 Ah nicht zugegriffen. Bloß eine Ladungsträgerkapazität von 300 Ah steht in einem vollen Lade-/Entladezyklus zur Verfügung. Eine vollgeladene Wechselbatterie wäre nach etwa 13 Stunden und 10 Minuten im Fahrbetrieb beim Reserveniveau angelangt und es bestünde der Bedarf für einen Batteriewechsel. An der Ladestelle kann ein Blei-Batteriesystem mit einer Rate von etwa $\frac{1}{4}$ C, das heißt mit einem Ladestrom von bis zu 125 A pro 500 Ah Nennladungsträgerkapazität geladen werden. Nach etwas mehr als 2,5 Stunden wäre die Konstantstromphase vorüber und der Ladevorgang kann nach der Konstantspannungsphase von mehr als einer 1,5 Stunde abgeschlossen werden. Einschließlich einer Ruhephase von etwas mehr als einer halben Stunde wäre eine Wechselbatterie ausgehend vom Reserveniveau nach etwa 5 Stunden wieder vollgeladen.

Die Lade- und die Entladedauer stehen sich im Verhältnis von ungefähr 1:3 gegenüber. Während ein Fahrzeug mit einer Wechselbatterie unterwegs ist können drei Wechselbatterien an der Station frisch geladen werden. Selbst unter Berücksichtigung der zum Batteriewechsel benötigten Zeit gebrauchte es für jedes dritte Fahrzeug eine Ladestelle in der Station.

Ein Erreichen dieser Minimalzahl ist allerdings nur dann möglich, wenn sowohl die Ladekapazität als auch die Batteriewechselkapazität der Station vollständig ausgeschöpft werden. Das bedeutet, dass der Fahrbetrieb gleichmäßig getaktet geschehen muss und die Batterietauche in regelmäßigen Zeitabständen vorgenommen werden müssen. Da dies in realistischen Auslastungssituationen für den Containerterminal allerdings nicht zutrifft, dürften die Simulationsstudien anzeigen, dass die Anzahl der Ladestellen in einem größeren Verhältnis zur Fahrzeuganzahl zu stehen hat.

4.1.1.3 Ergebnisse der Simulationsexperimente

Wie in den Säulendiagrammen in **Abbildung 80** zu sehen ist, wird unter höchstmöglicher Auslastung auf der Seeseite des Containerterminals ab einem Ausstattungsverhältnis zwischen 0,4 und 0,5 Ladestellen für je 1 batterie-betriebenes Fahrzeug praktisch jeder anstehende Transportauftrag bewältigt. Im Vergleich mit den Experimentergebnissen für die realistische Auslastungssituation fällt auf, dass über den gesamten Betrachtungs-

zeitraum einer Woche hinweg eine geringere Anzahl von Transportaufträgen angestanden hat. Bei wirklichkeitsgetreuem Eintreffen der Containerschiffe und ihrer ungleich verteilten Anzahl von zu importierenden und zu exportierenden Container ergeben sich Zeitabschnitte, in denen durch die B-AGV keine Transportaufträge zu bearbeiten sind. Die Spitzen der Transportlast konzentrieren sich zeitlich auf die Abfertigungszeiträume der großen Seeschiffe. In den Zeitabschnitten mit geringerer Transportlast entfallen auf die gesamte Fahrzeugflotte und demzufolge auf den Anteil der batterie-betriebenen Fahrzeuge so wenig Transportaufträge, dass die Fahrzeuge einen unterdurchschnittlichen Fahranteil haben und sich der Entladeteilzyklus mit den Wechselbatterien zeitlich streckt. Währenddessen wird die Station weniger gestresst und es können die Wechselbatterien insoweit geladen werden, dass im Durchschnitt längere Wartezeiten der Fahrzeuge für einen Batteriewechsel vermieden werden können.

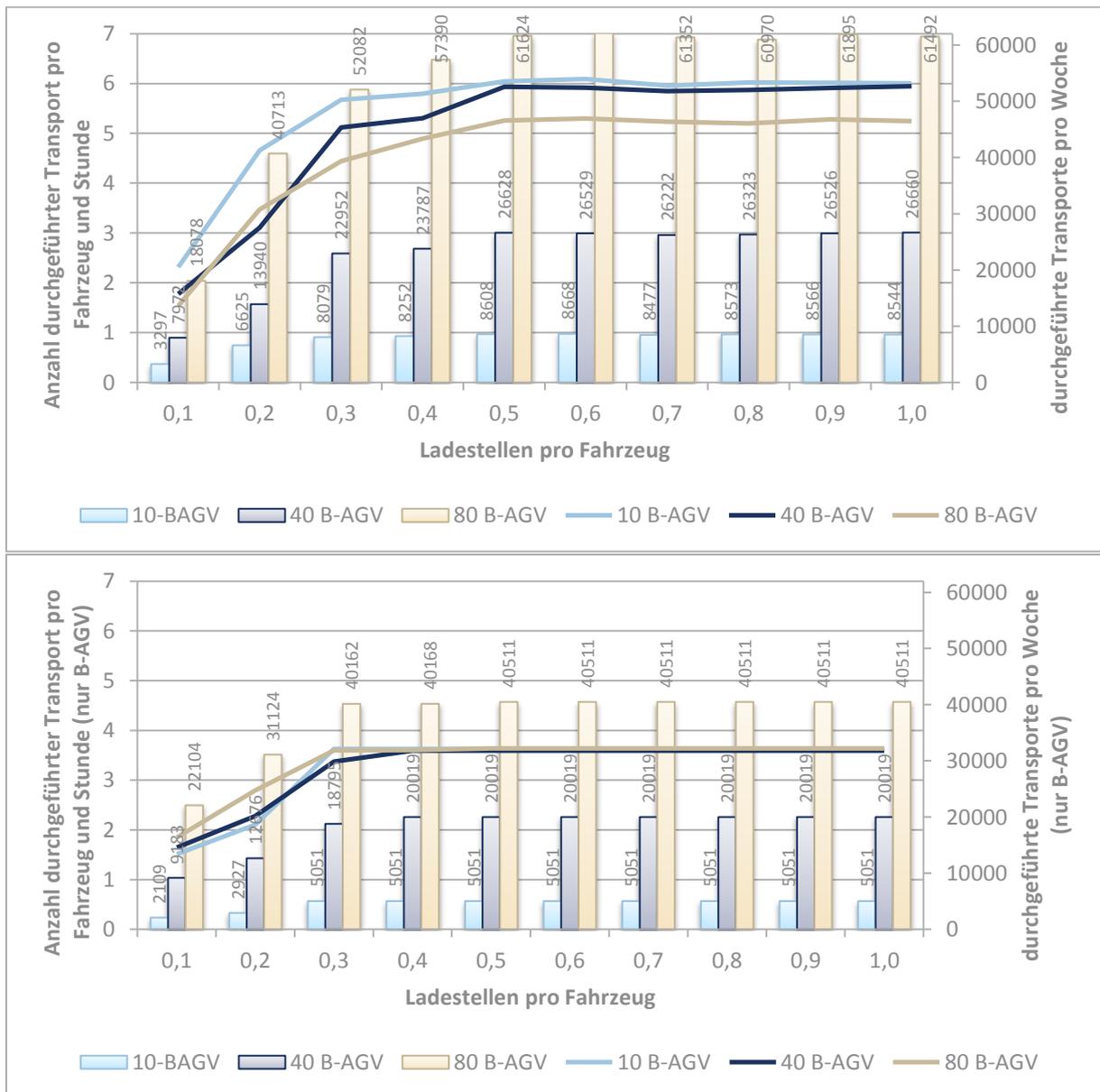


Abbildung 80: Diagramme mit gruppierten Säulen für die Transporte unter Maximalauslastung (oben) und realistischer Auslastung des Terminals (unten)

Weiter ist auffällig, dass die Transportleistung pro Fahrzeug und die Gesamtzahl der erledigten Transportaufträge unter realistischer Auslastung des Terminals ab einem Ausstattungsverhältnis von ca. 0,3 Ladestellen für je 1

batterie-betriebenes Fahrzeug unverändert bleiben. Darin äußert es sich, dass etwa eine Ladestelle genügt, um die Fahrbereitschaft von drei batterie-betriebenen Fahrzeugen sicherstellen zu können. Darüber hinaus kann mit dem Anteil der B-AGV in der Flotte keine höhere Transportleistungsfähigkeit erzielt werden als in einer Spitze der Transportlast abgefordert wird. Des Weiteren zeigt sich, dass in einer Mischflotte eine vorübergehende verminderte Transportleistungsfähigkeit im Anteil der B-AGV durch den Anteil der E-AGV wettgemacht werden kann. Wie in **Abbildung 81** zu sehen, können geringfügige Wartezeiten der B-AGV und die folglich abgeschwächte Transportleistungsfähigkeit durch die fortbestehende Fahrbereitschaft im Flottenanteil der E-AGV aufgefangen werden.

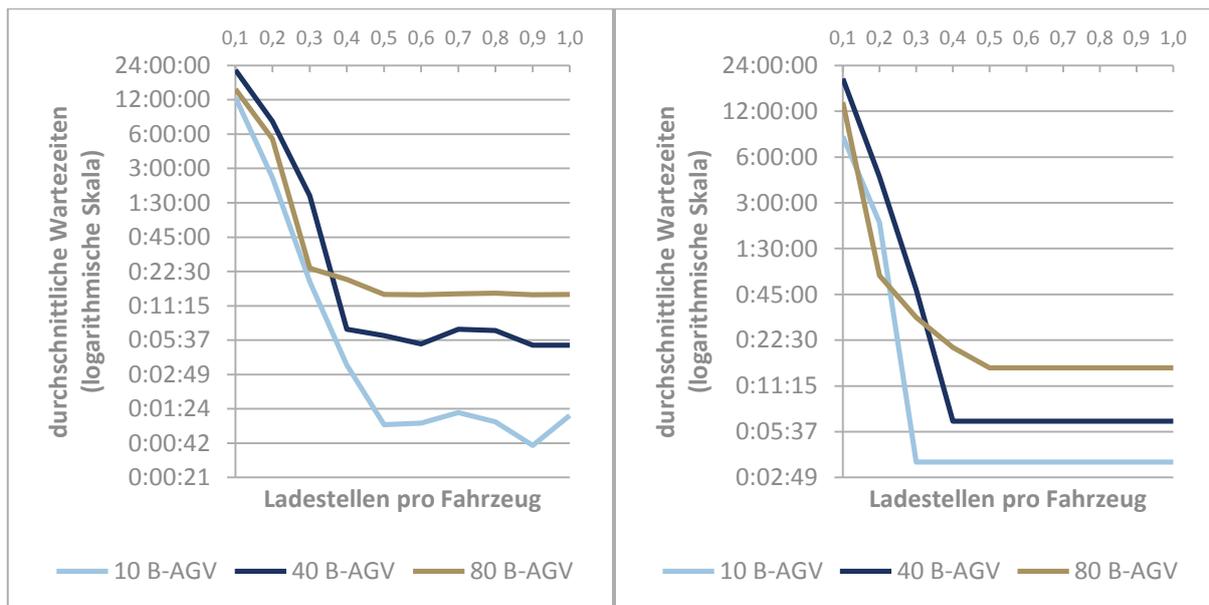


Abbildung 81: Diagramme für die Wartezeiten unter Maximalauslastung (links) und realistischer Auslastung des Terminals (rechts)

In den Simulationsexperimenten für die Maximalauslastung des Containerterminals war die Flottengröße uneinheitlich. Dabei zeigt sich, dass eine kleine Flotte von Fahrzeugen zu einer höheren Transportleistung pro Fahrzeug im Stande ist als eine große Fahrzeugflotte. Dies liegt darin begründet, dass sich bei einer großen Flotte die Fahrzeuge unter Maximalauslastung sozusagen in die Quere kommen – es ergeben sich größere Wartezeiten unter den Kai- und Lagerkränen. Systemisch betrachtet ist dafür auch die Produktivität an den Containerbrücken mitverantwortlich.

4.1.2 Studie der Fahrbereitschaft

In diversen Simulationsläufen war zu beobachten gewesen, dass es wahrscheinlich länger dauert, auf die Verfügbarkeit einer Wechselbatterie zu warten und einen Batteriewechsel vorzunehmen, wenn in einer Stunde zeitgleich ein höherer Bedarf für Batteriewechsel besteht.

Durch eine Weiterentwicklung des Batterien-Verwaltungs-Systems und die Einführung neuer Automatisierungsregeln ist zu vermeiden, dass bei mehreren B-AGV zugleich Bedarf für einen Batteriewechsel aufkommt (siehe dazu oben, logistische Optimierung).

In der Simulationsstudie zur „Fahrbereitschaft“ sollte näher darauf geschaut werden, welche Lade- und Batteriewechselstrategien nach Umstellung des Containerterminals auf einen Anteil von B-AGV in der Flotte vorteilhaft sind.

Es wurden Simulationsexperimente für eine B-AGV-Flotte mit 86 Fahrzeugen und der gleichmäßigen Aufteilung von Ladestellen in zwei Stationen unter Maximalauslastung des Containerterminals gemacht. Zum einen wurde ein Satz von Methodenbausteinen („herkömmliche Automatisierung“) verwendet, der die gegenwärtigen Automatisierungsregeln hinsichtlich des Zeitpunkts für den Batteriewechsel, Stationsauswahl und die Herausgabe einer Wechselbatterie wiedergibt. Das bedeutet, dass sich ein Fahrzeug beim Erreichen des Reserveniveaus zu einer nahegelegenen Station begibt, um dort die Wechselbatterie aufzunehmen, die vollgeladen ist und sich am längsten in der Station aufgehalten hat. Zum anderen wurde ein Satz von Methodenbausteinen verwendet, von denen erwartet wird, dass insbesondere die Batteriewechselkapazität besser ausgeschöpft werden kann („vorausschauende Automatisierung“). Für beide Automatisierungsansätze werden das Reserveniveau der Wechselbatterien und die Anzahl der Ladestellen in den Stationen variiert.

4.1.2.1 Ergebnisse

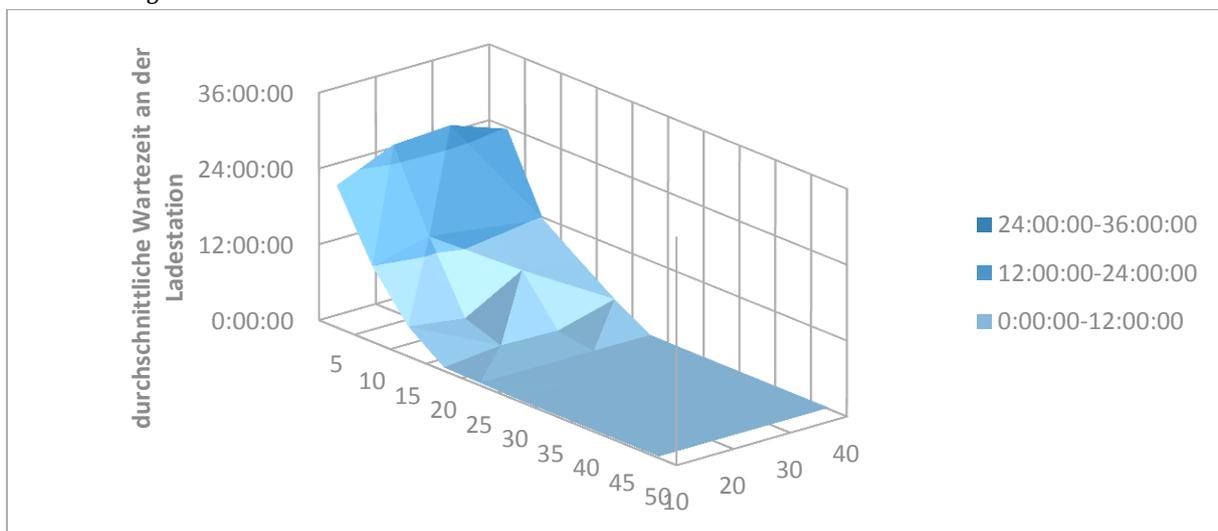


Abbildung 82: Oberflächendiagramm für die durchschnittliche Zeit ohne Fahrbereitschaft beim herkömmlichen Automatisierungsansatz

In der **Abbildung 82** sind für die Anzahl der Ladestellen und das festgelegte Reserveniveau aufgetragen, wie lange ein Fahrzeug im Durchschnitt keine Fahrbereitschaft hatte. Wird das Reserveniveau höher gelegt, so nimmt bei einer gleichbleibenden Anzahl von Ladestellen die Anzahl der durchgeführten Transporte erkennbar ab und die Wartezeit nimmt zu.

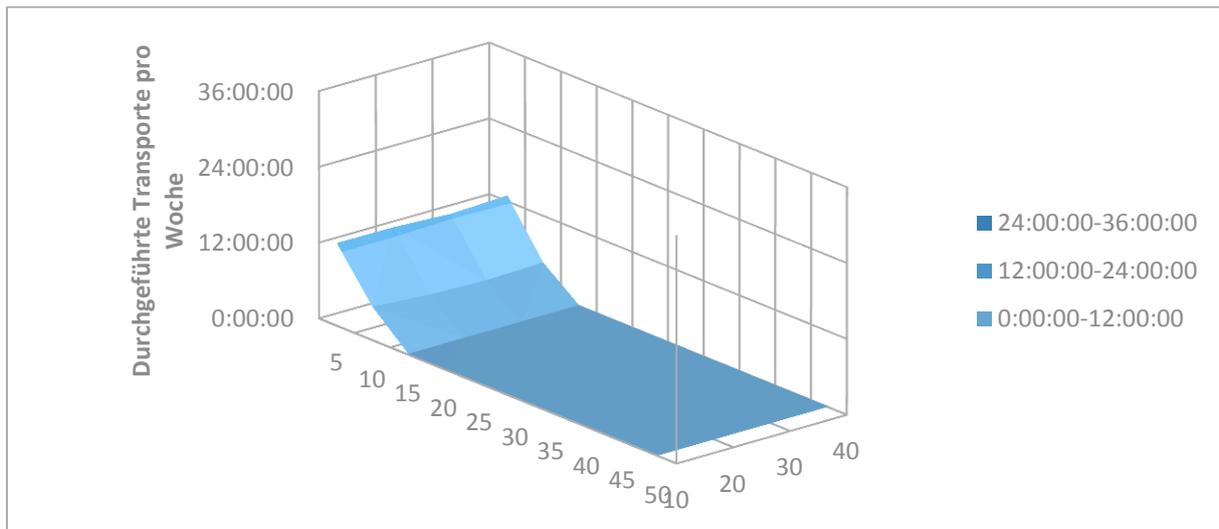


Abbildung 83: Oberflächendiagramm für die Gesamtzahl der Transport beim vorausschauenden Automatisierungsansatz

Wie in **Abbildung 83** zu sehen ist, können beim vorausschauenden Automatisierungsansatz bei einem auskömmlichen Reserveniveau und bei einer vergleichsweise niedrigen Anzahl von Ladestellen Wartezeiten rund um die Station vermieden werden.

4.2 Leistungstests für Lithium-Batteriesystemaufbauten und Umbau in Wechselbatterien

4.2.1 Beschaffung und Transport der Lithium-Batteriesysteme

Es wurden zwei Lithium-Batteriesysteme als Schwerlastfahrzeugbatterien für Leistungstests im Labor und zum Feldtest in dem B-AGV-System beauftragt. Dazu passend wurde eine Ladegeräteeinheit nebst einer Ladegerätsteuerung in Auftrag gegeben.

Die viel diskutierten Vor- und Nachteile bestimmter Zellchemien bezüglich der Sicherheit, der Anschaffungs- und Lebenszykluskosten, der Energie- und Leistungsdichte bis hin zur Wiederbeschaffbarkeit waren bewusst mehr oder weniger ausgeblendet worden, so dass im BESIC-Projekt möglichst unvoreingenommen nach einer innovativen Batteriesystemlösung für den Feldtest mit dem B-AGV-System Ausschau gehalten werden konnte. Es wurden Anforderungen zusammengestellt, um eine grundlegende Sicherheit des Systems gewährleisten zu können. An dieser Stelle seien beispielhaft die Verwendung einer Hauptschützbox mit Schmelzsicherungen sowie zusätzliche Leistungsschalter genannt. Weiterhin müssen die Kontroll- und Sicherheitseinheiten eines Batterie-Management-System in der Lage, bei einem extern wie intern verursachten Fehlerfall automatisch abzuschalten. Dies bedeutet eine allpolige Abschaltung zum Beispiel bei Verletzung der maximalen Ladespannung, der Stromtragfähigkeit oder Erreichen von Temperaturgrenzwerten. Die Sicherheitsanforderungen wurden unter dem allgemeinen Systemdenken bestätigt und wurden auch hinsichtlich der Einbindung in die Sicherheitseinrichtungen der Batteriewechselstation mitgestaltet. Im Hinblick auf die Verwendung im B-AGV-System waren Anforderungen zur sicherheitsgerichteten Kommunikation und der Kommunikation der Betriebsabläufe / Batteriewechselvorgänge zu stellen, das heißt die Einbettung in das Automatisierungs- und Steuerungsumfeld der Batteriewechselstation zu berücksichtigen.

Durch die Beschaffung der Lithium-Batteriesysteme war im BESIC-Projekt ein Überblick zu den gängigen Zellchemien und Batteriesystemtechnologien gewonnen worden. Die Marktanteile von Lithium-Ionen-Polymer-Batterien haben in den letzten Jahren stark zugenommen. Dieser Entwicklungsstrang mag auch für das Anwendungsgebiet eines Containerterminalbetriebs interessant sein, insoweit sich in Relation zu den höheren Anschaffungskosten eine höhere Zyklenfestigkeit ergibt, die Batteriesysteme zügig geladen werden können und die Anzahl der Ladeplätze insgesamt verringert werden kann. Lithium-Ionen-Polymer-Batterien gleichen in Bezug auf die Anoden- und Kathodenmaterialien herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterien, bis auf die Tatsache, dass der flüssige Elektrolyt durch einen Elektrolyten auf Polymerbasis ersetzt wurde. Um hinsichtlich der Lebenszykluskosten möglichst verschiedenartige Zellchemien zu untersuchen, waren eine Typdifferenzierung beschlossen und die Ausschreibungsunterlagen in diese Richtung ausgearbeitet worden. Jedenfalls hatte ein Forschungsinteresse dafür bestanden, als Typ 1-Batteriesystem die Lithium-Ionen-Batterien / Lithium-Ionen-Polymer-Batterien für Elektromobilität in der Containerlogistik in den Benchmarkvergleich mit Blei-Säure-Batterien zu bringen. Daneben sind allerdings auch Elektrolyte auf Polymerbasis für Batterien mit metallischem Lithium, also Lithium-Metall-Polymer-Batterien in der Entwicklung. Dieser Entwicklungsstrang war ebenfalls als Typ 2-Batteriesystem mit hohem Interesse im Benchmarkvergleich zu betrachten gewesen.

Im Verlauf der Ausschreibung der Batteriesysteme und der Ladegeräteeinheit waren zwei Angebotsströme auszumachen gewesen: Zum einen war es wie am Beispiel des Typ 1-Batteriesystems naheliegend erschienen, die für Elektrobusse entwickelten Batteriesystemlösungen in ein B-AGV zu übertragen. Obwohl es sich im Busverkehr oftmals nur um teilweise elektrifizierte Antriebstrangkonzeppte handelt, das heißt die Batteriesysteme und Elektromotoren hinsichtlich der benötigten mechanischen Leistung nur eine unterstützende Aufgabe haben,

liegt die erforderliche Systemspannung auf einem ähnlichen Niveau. Platzproblemen wird bei Antriebsstrangkonzepthen für Elektrobusse zumeist entgegen gewirkt, indem das Batteriesystem in einer Fahrzeugdachkonstruktion aufgesetzt wird. Zum zweiten war der Einbau von relativ großräumigen Grundmodulen aus dem Yachtbau möglich erschienen, die auf einen hohen Energiegehalt, hohe Verfügbarkeit und Betriebssicherheit ausgelegt sind. Denn der Bauraum einer Wechselbatterie im B-AGV, die seitlich in das Fahrzeug eingegeben wird, ist verglichen mit Staplern, Portalhubwagen oder anderen Nutzfahrzeugen auf einem Terminalgelände ziemlich großzügig. Die Grundfläche eines B-AGV wird maßgeblich durch die Aufstellfläche von zwei 20-Fuß-Containern bestimmt. Daneben war auch am Beispiel des Typ 2-Batteriesystems ein Bestreben zu erkennen gewesen, eine Batteriesystemlösung für Materialflusssysteme mit kleinen Zuladungsgewichten auf die Transporte von Containern mit größerem Gewicht hoch skalieren zu wollen.

Nach deren Beauftragung konnte die Ausführungsplanung mit den zwei Herstellern der Batteriesysteme und der Ladegeräteeinheit vorangetrieben werden. Im Zuge der Planungsgespräche wurden ein Systemüberblick mit sämtlichen beteiligten Hardware- und Softwarekomponenten erstellt und die elektrotechnischen nebst datentechnischen Systemgrenzen beschrieben. Darüber hinaus wurden die Anforderungen der jeweiligen baulichen Integration der Batteriesysteme in einen Batteriewechselrahmen, die Möglichkeit für den Einbau zusätzlicher Kühlaggregate und die Spannungsversorgung der Elektronik auf den Batteriesystemen geklärt. Ein wichtiger Gesprächspunkt war auch die Festlegung der Anwendungsprotokolle der CAN-basierten Kommunikation zwischen Ladegeräteeinheit und Batteriesystemen sowie ihrer möglichen Ansteuerung durch übergeordnete Steuereinheiten in der Batteriewechselstation. Es wurden die Anwendungsfälle bezüglich des automatischen Batteriewechsels, dem stationären Laden, dem einfachen Kontaktieren und Dekontaktieren sowie dem Fahren mit dem Batteriesystem zusätzlich zu den Funktionalitäten der Messwertaufzeichnung (Data Logging) und Tiefentladeschutz, etc. beschrieben. In diesem Zusammenhang wurde auf Basis bestehender standardisierter Geräteprofile eine Spezifikation der zu übermittelnden Datenfelder für eine CANopen- bzw. eine SAE J1939-Netzwerkumgebung vorgenommen.

Ebenfalls wurde zur Erprobung der Batteriesysteme im Feld geplant, die Ladegeräteeinheit innerhalb eines speziell ausgestatteten Standard-20-Fuß-Containers auf dem Vorplatz der Batteriewechselstation auf dem Terminalgelände zu platzieren. Es wurde das Aufstapeln des Ladegerätcontainers für die Lithium-Batteriesysteme in dritter Ebene und die dafür notwendigen Ausstattungsmerkmale festgelegt. In den Anforderungsspezifikationen für die Batteriesysteme und die Ladegeräteeinheit waren die Anschlussbedingungen in der Praxisumgebung mit beschrieben worden. Insoweit wurde die Integration der Lithium-Batteriesysteme und der Ladegeräteeinheit an der dedizierten Ladestelle einschließlich der Kabelwege und Sicherheitsvorkehrungen skizziert.

Das Typ 1-Batteriesystem wurde zusammen mit der beschafften Ladegeräteeinheit in einem Container verbaut angeliefert, so dass nach Anschluss an die forschungsseitige Infrastruktur (Fundamente, Stromversorgung, Datenleitungen, etc.) beim EFZN in Goslar umgehend mit den Vorbereitungen der Abnahmen begonnen wurde. Das Typ 2-Batteriesystem wurde hingegen demontiert ausgeliefert, so dass nach Anlieferung am EFZN zunächst eine bautechnische Installation in den gestellten Container erfolgte. Im Anschluss daran wurde zunächst batteriesystemseitig die zur Kommunikation mit der Ladegeräteeinheit nötige Software implementiert, um beide Batteriesysteme mit einer identischen Schnittstelle zu versehen. Die ersten Tests mit der Ladegeräteeinheit zeigten, dass die einzelnen Batteriemodule aufgrund ihres unterschiedlichen Ladezustandes zunächst gebalanciert werden mussten, da die Funktion des Batteriesystems ohne dies nicht in vollem Umfang hätte getestet werden können. Des Weiteren zeigte sich auch während der ersten Funktionstests zusätzlicher Bearbeitungsbedarf im Hinblick auf die Kommunikationsschnittstelle, so dass die Abnahme erst nur vorbehaltlich erfolgen konnte.

Nach Abschluss der Leistungsprüfungen im Systemaufbau sollten die zwei Batteriesysteme sowie die Ladegeräteeinheit zur Fahrzeugintegration übergeben werden, wofür die nötigen Transporte von Goslar nach Düsseldorf durchgeführt wurden. Im Falle des Batteriesystems vom Typ 2 zeigte sich jedoch, dass dieses nicht über ein Gutachten gemäß UN 38.3 (den sogenannten Transporttest) verfügte und somit kein Standard-Gefahrguttransport möglich war. Schließlich ergab sich die Möglichkeit der Nutzung einer Sondervereinbarung M228 für Batterieprototypen, so dass keine Sondergenehmigung für den Transport beantragt werden musste. Eine Voraussetzung war es jedoch wie in **Abbildung 84** zu sehen ist, dass das Batteriesystem und seine Verpackung sehr spezifischen Anforderungen genügen mussten.



Abbildung 84: Transportverpackung eines Trogs für ein Typ 2-Batteriesystemmodul

4.2.2 Abnahmeprüfung und Leistungstests mit losen Aufbauten der Lithium-Batteriesysteme

Lithium-Batteriesysteme müssen innerhalb ihrer zulässigen Betriebsgrenzen betrieben werden, um deren Sicherheit zu gewährleisten, weshalb das verbaute Batterie-Management-System eigenständig das jeweilige Batteriesystem schützen muss. Aus diesem Grund wurden bei beiden Batteriesystemaufbauten kritische Betriebszustände simuliert, welche in Tabelle 12 mit der gewünschten Reaktion kurz aufgezeigt werden. Die durchzuführenden Sicherheitstests gehörten zu einer Abnahmeprüfung, die vorab der eigentlichen Leistungstests zu erfolgen hatte.

Tabelle 12: Testfälle für die Abnahmepezedur und die ersten Inbetriebnahmen der Lithium-Batteriesysteme

Testgegenstand	Vorgehen im Test	Erwartetes Verhalten
Unterbrechung Interlock / der Kommunikation zwischen Ladegerät und Batteriesystem	Entfernen des Ladekabels / des CAN-Adapters	Batteriesystem und Ladegerät müssen abschalten
Softwareprüfung der Spannungsmessung (BMS)	Vorgabe eines falschen Zellspannungswertes / Temperaturwertes	Batteriesystem muss abschalten
Ausfall des Batteriemanagementsystems	Abklemmen des BMS (Unterbrechung der Kommunikation zwischen Master und Slave)	Batteriesystem muss abschalten
Abschaltverhalten bei Über- oder Unterspannung Batteriesysteme dürfen nur innerhalb der zulässigen Spannungsgrenzen betrieben werden, um Überladung und Tiefentladung zu verhindern.		Batteriesystem muss bei Spannungsgrenzwerten abschalten
Kurzschlussabsicherung Nachweis durch Kurzschlussstromberechnung seitens der Hersteller und Auslegung entsprechender Sicherungen		

Beide Batteriesysteme konnten die gewünschten Schutzmechanismen erfolgreich nachweisen, wodurch die grundlegenden Sicherheitsfunktionen gegeben sind. Zusätzlich dazu wurden im Rahmen der Abnahmen die geforderten Nenndaten (Kapazität, Spannungslage, Nennstrom) der Batteriesysteme überprüft, welche ebenfalls in den geforderten Bereichen lagen.

Weiterer Schwerpunkt der Tests der Systemaufbauten in der Laborumgebung war die Untersuchung des Systemverhaltens bei verschiedenen Ladeleistungen. Die bisher in den Containertransportern verwendeten Blei-Batteriesysteme erlauben lediglich Ladezeiten im Bereich von fünf bis sechs Stunden. Im Gegensatz dazu bieten Lithium-Batteriesysteme heutzutage die Möglichkeit mit deutlich höheren Ladeleistungen zu verfahren, so dass die drei Varianten „langsames Laden“, „normales Laden“ und „Schnellladung“ zu untersuchen waren.

4.2.2.1 Leistungstests mit normalem Laden

Die **Abbildung 85** zeigt beispielhaft den Verlauf einer „normalen Ladung“ des Typ 1-Batteriesystems.

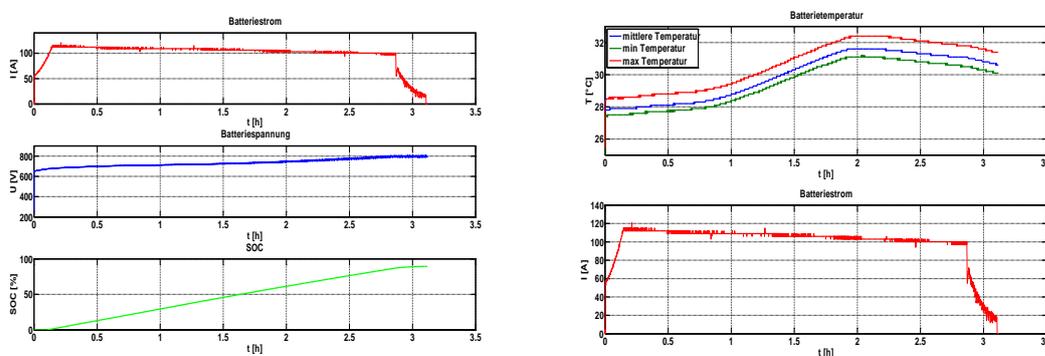


Abbildung 85: Verlauf der Kenngrößen der Typ 1 Batterie bei einer Ladung mit 80kW

Als Vorgabe für die „normale“ Ladung galt es, eine Ladedauer von ca. drei Stunden zu erreichen, weshalb eine Ladeleistung von 80 kW gewählt wurde. Der maximale Ladestrom lag dabei im Bereich von etwa 120 A, was eine

moderate Erhöhung der mittleren Batterietemperatur von rund 3 °C zur Folge hatte. Ebenfalls lässt sich in **Abbildung 85** erkennen, dass das Batteriesystem vom Typ 1 über eine aktive Stromregelung verfügt. So wird im unteren Ladezustandsbereich der Ladestrom zunächst begrenzt, um der Alterung entgegen zu wirken.

4.2.2.2 Leistungstests mit Schnellladung

In **Abbildung 86** ist der Verlauf der „Schnellladung“ des Batteriesystems Typ 1 dargestellt.

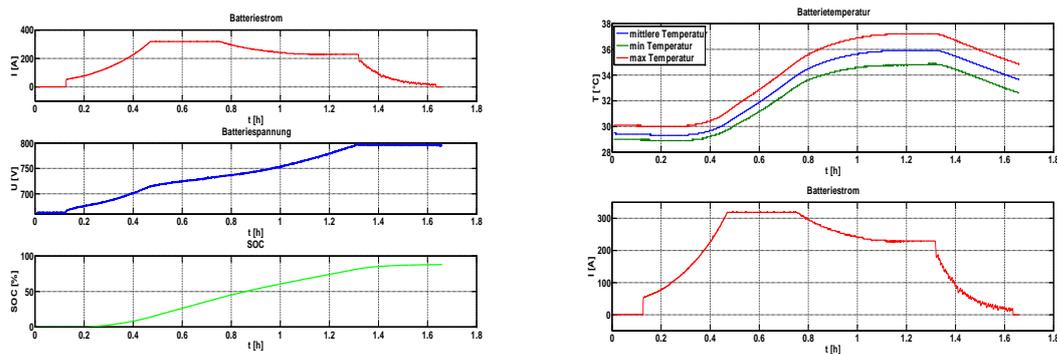


Abbildung 86: Verlauf der Kenngrößen der Typ 1 Batterie bei einer Ladung mit 250kW

Dabei ist zu erkennen, dass die Schnellladung 90 Minuten andauerte. Hierfür wurde von der Ladegeräteeinheit die maximale Ladeleistung von 250 kW zur Verfügung gestellt, wobei das Batteriesystem zunächst im unteren Ladezustandsbereich den Ladestrom begrenzte. Ab einem Ladezustand von 15 % erfolgte die Ladung mit 1 C / 318 A, bis die maximale Zelltemperatur 35 °C erreichte. Die aktive Stromregelung des Batteriesystems ist so ausgelegt, dass der maximale Ladestrom in Abhängigkeit von Ladezustand und Batterietemperatur begrenzt wird. Diese Regelung soll eine größtmögliche Lebensdauer des Systems gewährleisten. Für den Test der Schnellladefähigkeit wurde eine Starttemperatur von 27 °C gewählt, um einen vorherigen Einsatz des Batteriesystems nachzuempfinden. Bei einer Starttemperatur von beispielsweise 20 °C wäre eine komplette Schnellladung wohl auch in ca. 75 Minuten zu realisieren, da in diesem Fall länger mit dem maximalen Ladestrom von 318 A geladen werden könnte.

4.2.3 Untersuchung des Einbaus und der Steckvorrichtungen der Lithium-Batteriesysteme

Die Integration der jeweiligen Lithium-Batteriesysteme in einen Containertransporter beinhaltet einen mechanischen, einen elektrotechnischen und einen steuerungstechnischen Anteil. Besonders wichtig sind hierbei die möglichst vollständige Kompatibilität der Lithium-Batteriesysteme zu den Batterie-AGV (B-AGV) und die zukünftige Austauschbarkeit mit den vorhandenen Wechselbatterien auf Basis von Blei-Batteriesystemen.

Der Ausgangspunkt für die mechanische Integration der Lithium-Batteriesysteme war der bekannte Batterietragrahmen. Er verfügt über die erforderlichen Auflagepunkte für das Einsetzen der Wechselbatterien im Fahrzeug und im Hochregal der Station. Des Weiteren ist in ihm die Anschlussgeometrie für die Multikupplung als elektrische Schnittstelle zum Fahrzeug und zur Ladegeräteeinheit integriert. Beide Schnittstellen dürfen von der Geometrie her nicht verändert werden und sind somit starre Vorgaben.

Die mechanische Integration beinhaltet zunächst eine detaillierte Bauraumuntersuchung, bei der neben den Batterietrögen selbst auch die vorhandenen Nebenaggregate und erforderliche Schaltkästen mit berücksichtigt wurden. Darüber hinaus wurden die möglichen Kabelwege und die Position und Zugänglichkeit von Steckern untersucht. Die Zugänglichkeit der Steckverbindungen ist insofern besonders wichtig, da in Fehlerfällen die elektrische Verbindung zwischen Batterie und Fahrzeug sicher von außen zu lösen sein soll. Weiterhin muss die

Erreichbarkeit der Ladestecker gegeben sein, wenn die Wechselbatterien an Bord des Fahrzeugs geladen werden sollen.

Mit Hilfe von 3D-CAD wurden die beiden Batterietragrahmen konstruiert, die erforderlichen Zeichnungen abgeleitet und Stücklisten erstellt.

In der Abbildung 87 ist auf der linken Seite das 3D-CAD-Modell des Typ 1-Batteriesystems ersichtlich. Da die Abmessungen der Batterietröge deutlich von den bisher verwendeten Blei-Batteriesystemen abweichen, musste der bestehende Batterietragrahmen komplett überarbeitet werden. Auf Grundlage der Zeichnungen und Stücklisten wurden die benötigten Einzelteile im Werk in Düsseldorf gefertigt und zu Schweißbaugruppen zusammengefügt. Die Zellen sind in sechs Batterietrögen eingebaut, wobei je drei Batterietröge übereinander auf beiden Seiten des Batterietragrahmens montiert sind. Die drei übereinander gestapelten Batterietröge sind jeweils in Serie geschaltet, die beiden Stapel bilden zwei parallele Stränge. Im mittleren Bereich des Tragrahmens sind die beiden Kühl-/Heizaggregate angeordnet. Des Weiteren sind die erforderlichen Schaltkästen und Elektroverteilungen zu erkennen.

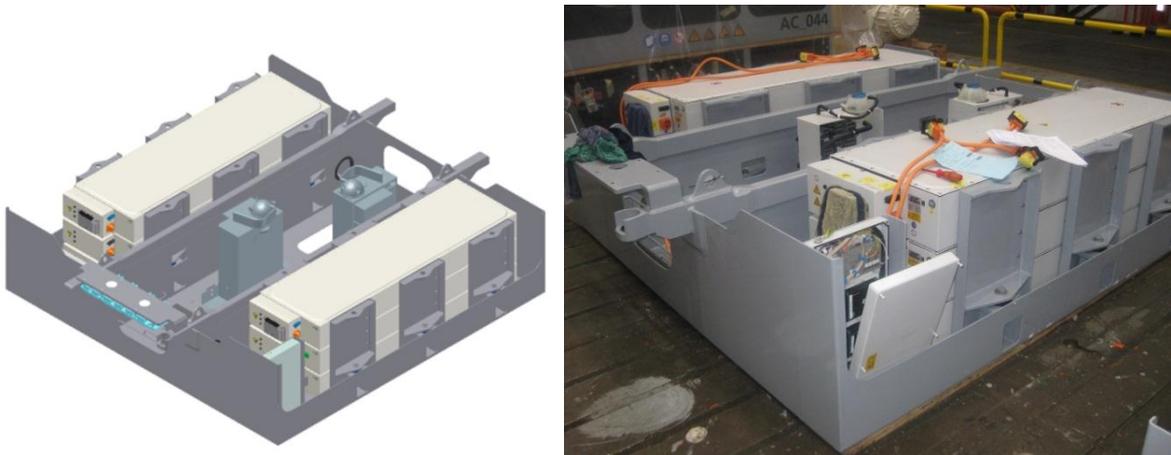


Abbildung 87: Aufnahmen von der Konstruktion des Typ 1-Batteriesystems

Die Batterietröge des Typ 2-Batteriesystems sind so aufgebaut, dass die Zellen und die Elektronik in genormten Batterietrögen integriert sind. Sie sind baugleich zu den der bisher verwendeten Blei-Batteriesystemen, so dass an diesem Batterietragrahmen nur geringfügige Änderungen durchgeführt werden mussten. Diese beschränkten sich auf zusätzliche Befestigungspunkte und Halter. Die komplette Wechselbatterie besteht aus insgesamt neun Trögen, wobei in acht der Tröge die Batteriezellen untergebracht sind. Der neunte Trog wird als Techniktrog bezeichnet und enthält ausschließlich Elektronik. Die acht einzelnen Batterietröge werden in Serie verschaltet. Die fertige Konstruktion als 3D-CAD-Modell und der aktuelle Stand der Montage sind in **Abbildung 88** dargestellt.

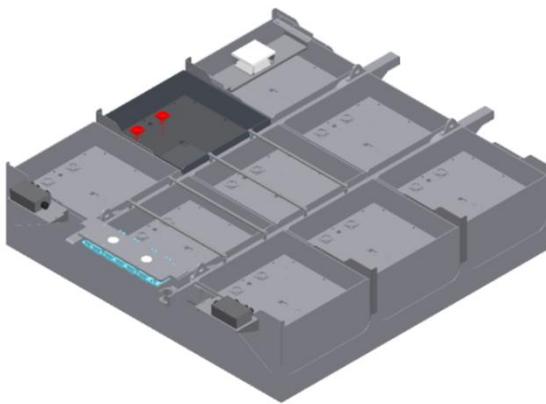


Abbildung 88: Aufnahmen von der Konstruktion des Typ 2-Batteriesystems

Die elektrischen Schnittstellen beider Wechselbatterien sind nach außen kompatibel gestaltet, da sie im selben Fahrzeug eingesetzt und auf demselben Ladeplatz bzw. mit derselben Ladegeräteeinheit geladen werden. Im Vergleich zu einem Blei-Batteriesystem ergab sich bei den Lithium-Batteriesystemen eine hohe Anzahl von Verbindungstypen (z. B. elektrischer Hochspannungsanschluss und eine Niedrigspannungsversorgung (24 V-Versorgung), Kühlung/Heizung und CAN-Kommunikation). Für die Festlegung der benötigten Anzahl von Steckern wurden Single-Line-Diagramme und tabellarische Erläuterungen verwendet. Zudem wurden für den Aufbau der Wechselbatterien auf Basis der Lithium-Batteriesysteme entsprechende Schalt- und Stromlaufpläne gezeichnet.

Für den Betrieb der Wechselbatterien im Fahrzeug und die Durchführung von Ladevorgängen ist eine Kommunikation zwischen den Batterie-Management-Systemen (BMS) der Wechselbatterien und dem Fahrzeugsteuerungssystem bzw. der Ladegerätesteuerung erforderlich. Diese erfolgt über eine CAN-Bus-Schnittstelle unter Anwendung des SAE J1939 Standards, welcher hauptsächlich bei Nutzfahrzeugen zur Übermittlung von Diagnosedaten (z.B. Motordrehzahl, Temperatur) und Steuerungsinformationen verbreitet ist. Für die steuerungstechnische Integration der beiden Batteriesysteme wurde eine sogenannte CAN-Matrix abgestimmt, in welcher die verfügbaren Datenfelder für die Kommunikation zwischen Batterie-Management-System, dem Fahrzeugsteuerungssystem und der Ladegerätesteuerung definiert sind.

Des Weiteren wurden die Ein- und Ausschalttroutinen für die Wechselbatterien festgelegt, so dass beispielsweise nach einem Batteriewechselvorgang ein „Losfahren“ mit den Batterien überhaupt möglich ist. Sie bildeten die Basis für eine spätere Anpassung der Fahrzeugsteuerung.

Es wurde zudem eine Fehlerliste mit den Batterieherstellern abgestimmt, in der mögliche Fehler von den Batterien sowie die daraus abzuleitenden Reaktionen der Fahrzeugsteuerung festgehalten sind.

Die Technologie der Lithium-Batteriesysteme war für die technischen Mitarbeiter am Werkstandort in Düsseldorf und die Mitarbeiter auf dem Terminalgelände neu, so dass im Vorfeld der Arbeiten eine detaillierte Gefährdungsanalyse mit den zuständigen Meistern und dem Sicherheitsbeauftragten durchgeführt worden war. Darin waren alle möglichen Gefahren, die bei Arbeiten an den Batteriesystemaufbauten und späteren Wechselbatterien auftreten können, zusammengefasst worden. Dies bildete die Basis für eine Unterweisung der entsprechenden Mitarbeiter.

4.2.4 Konstruktion der Tragrahmen für die Lithium-Batteriesysteme

Beide losen Batteriesystemaufbauten wurden am Werk in Düsseldorf jeweils in einen Batterietragrahmen eingebaut; mit **Abbildung 89** und **Abbildung 90** sind die fertigen Wechselbatterien noch einmal gegenüber gestellt:

- Das Typ 1-Batteriesystem hatte aus sechs Batterietrögen bestanden, die seitlich in den Tragrahmen integriert worden sind. Des Weiteren verfügt es über zwei mittig untergebrachte kombinierte Heiz- und Kühlaggregate, mit welchen die Batteriemodule im Betrieb temperiert werden können.

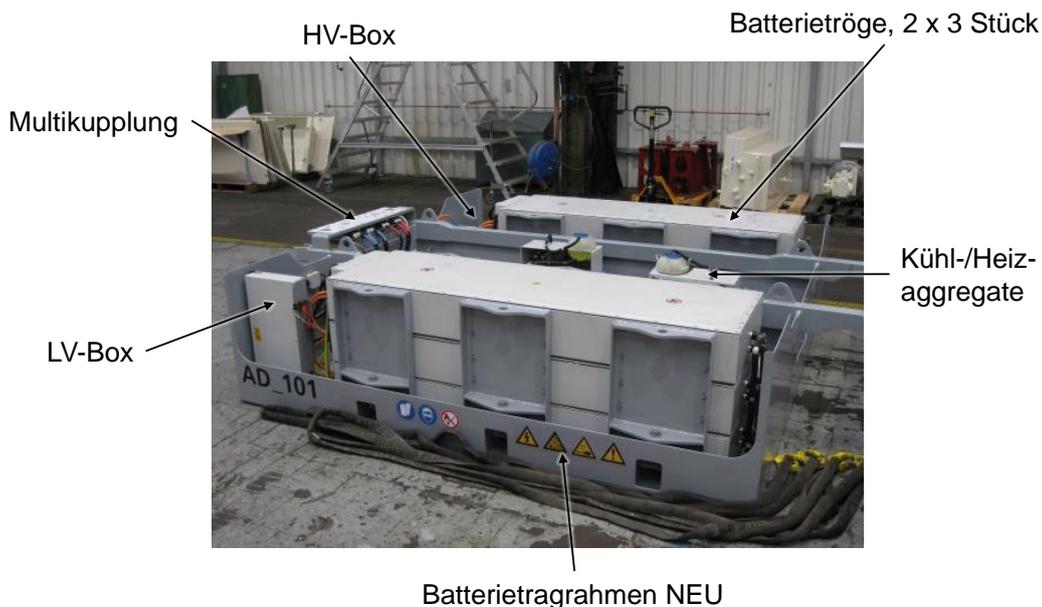


Abbildung 89 Aufgebaute Wechselbatterie auf Basis des Typ 1-Batteriesystems

- Das Typ 2-Batteriesystem hatte aus acht Batterietrögen sowie einem Technikrog bestanden, in welchem sich unter anderem das Batterie-Management-System (BMS) befindet. Eine Temperierung der Batteriesystemmodule ist nach Aussage des Herstellers für das Einsatzgebiet eines Containerterminals nicht erforderlich und wurde daher auch nicht berücksichtigt.

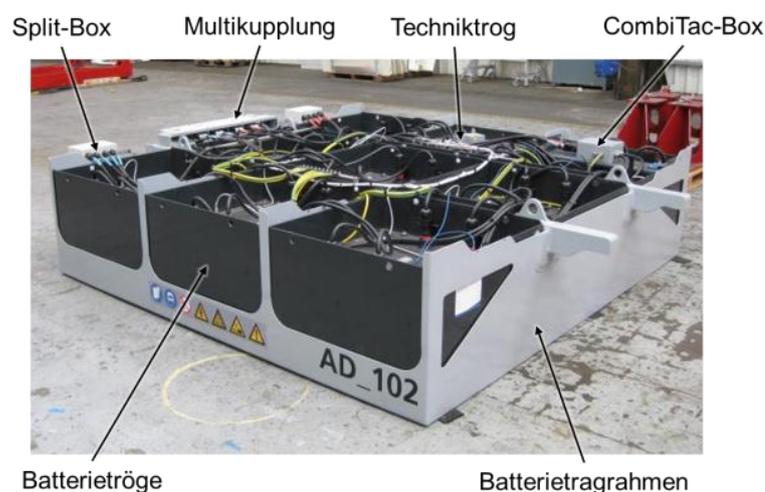


Abbildung 90 Aufgebaute Wechselbatterie auf Basis des Typ 2-Batteriesystems

Im Automatikbetrieb werden die Batteriesysteme beim Laden mit den Ladegeräteinheiten und während des Betriebs mit dem AGV über eine Multikupplung verbunden. Zum einen werden die Batteriesysteme für das Laden/Entladen im Hochspannungsbereich sowie zur Versorgung des BMS im Niedrigspannungsbereich elektrisch

angebunden. Zum anderen werden sie dabei über einen CAN-Bus datentechnisch angebunden. Beim Typ 1-Batteriesystem werden darüber hinaus Kühlung und Heizung von außen mit elektrischer Energie versorgt. Dank einer Steckvorrichtung verfügen die Batteriesysteme über eine gesonderte Schnittstelle für den Handbetrieb.

Nach dem Umbau der losen Batteriesystemaufbauten in die Wechselbatterien für die B-AGV wurden die Inbetriebnahme des speziellen Versuchsfahrzeugs und Testfahrten mit den Lithium-Batteriesystemen am Werkstandort in Düsseldorf vorbereitet. Wie in **Abbildung 91** zu sehen ist, wurde dazu der Ladecontainer nach Düsseldorf angeliefert und dort für das Handladen in Betrieb genommen. Für die Tests in Düsseldorf wurde der Ladecontainer an die Spannungsversorgung des Werks angeschlossen. Um eine ausreichende Funktionalität für den Betrieb im Terminal zu erhalten, wurde in den Ladecontainer ein Verteilerschrank integriert, der einerseits ein Laden von im AGV befindlichen Wechselbatterien im Handbetrieb ermöglicht und andererseits den Automatikbetrieb in der BWS erlaubt. Bei den ersten Funktionstests mit dem Ladecontainer wurde die Kommunikation zwischen dem batterie-seitigen BMS und der Ladegeräteeinheit untersucht.



Abbildung 91: Aufstellcontainer mit Ladegeräteeinheit für Lithium-Batteriesysteme am Werkstandort in Düsseldorf und Verteilerschrank mit Steckvorrichtung Automatikbetrieb/Handladebetrieb

Es erfolgte zunächst eine Erprobung der Ladevorgänge mit den beiden Lithium-Batteriesystemen, ohne dass diese in ein Fahrzeug eingesetzt waren. Ein Ladevorgang kann im manuellen Betrieb über die Bedien- und Beobachtungsstation (BuB-Rechner) angesteuert werden, die wiederum mit dem Laderegler verbunden ist. Der BuB-Rechner ermöglicht auch eine Entladung, was besonders für die durchgeführten Tests ohne Fahrzeug wichtig war. Beim Entladen wird die den Batteriesystemen entnommene Energie wieder in das Netz zurückgespeist.

Für die Versuchsfahrten auf dem Testfeld in Düsseldorf wurden die im B-AGV befindlichen Wechselbatterien zum Aufladen über die gesonderte Schnittstelle für den Handbetrieb angeschlossen.

Die Umrüstung eines dedizierten Fahrzeugs umfasste eine Anpassung der Multikupplung und der fahrzeuginternen Verschaltung sowie eine Adaption der Steuerungssoftware (Fahrzeug-SPS) und der Navigationssoftware (Navimatic). Die elektrischen Änderungen waren unter anderem notwendig, weil die Lithium-Batteriesysteme jeweils eine Nennspannung von 720 V liefern und auch auf diesem Spannungsniveau geladen werden. Bei den Blei-Batteriesystemen werden die einzelnen Batterieblöcke mit jeweils 80 V Nennspannung angeschlossen und durch einzelne Ladegerätemodule geladen. Erst im B-AGV für den Fahrbetrieb werden sie mit Hilfe der Multikupplung zum Erreichen der Systemspannung in Reihe geschaltet. Die Änderung der Steuerung umfasste auch die veränderte Kommunikation zwischen Batterie-Management-System (BMS) und Fahrzeugsteuersystem,

da bei den Lithium-Batteriesystemen weitere Batteriesysteminformationen durch die Steuerung des B-AGV auszuwerten sind und ein deutlich komplexeres BMS vorliegt.



Abbildung 92: AGV-87 mit Testgewicht auf dem Testfeld von TEREX in Düsseldorf

Vorab erfolgten auf dem Testfeld einige Referenzfahrten mit einem Blei-Batteriesystem, um eine direkte Vergleichbarkeit zwischen Blei-Batteriesystemen und Lithium-Batteriesystemen des BESIC-Projekts zu ermöglichen. Die **Abbildung 92** zeigt das AGV-87 (dediziertes Versuchsfahrzeug für die Lithium-Batteriesysteme) bei der Testdurchführung am Werk in Düsseldorf.

Bei den Testfahrten wurden zunächst mit dem Blei-Batteriesystem und später mit beiden Lithium-Batteriesystemen die Fahrgeschwindigkeit des B-AGV (4,5 m/s und 6 m/s), die Zuladung (ohne Beladung, mit Testgewicht 15 t, mit Testgewicht 40 t) sowie die Fahrstrecke (lange Gerade und Kurven) variiert.

Für jeden Batterietyp wurden somit jeweils zwölf Versuche mit je sechs Fahrten durchgeführt. In Tabelle 1 ist eine Matrix mit dem Versuchsprogramm für die Lithium-Batteriesysteme mit dem AGV-87 auf dem Testfeld in Düsseldorf enthalten. In der Tabelle 13 ist das Testprogramm für die Vorinbetriebnahme am Werksstandort aufgeführt.

Tabelle 13: Testprogramm für die Vorinbetriebnahme eines Containertransporters am Werksstandort in Düsseldorf

Strecke	Beladung	Maximalgeschwindigkeit	Kurvengeschwindigkeit	Versuche Nr. 1 bis 6
Lange Gerade (hin und zurück)	0 t	4,5 m/s	n. v.	
Lange Gerade (hin und zurück)	15 t (einseitig)	4,5 m/s	n. v.	
Lange Gerade (hin und zurück)	40 t	4,5 m/s	n. v.	
Lange Gerade (hin und zurück)	0 t	6,0 m/s	n. v.	
Lange Gerade (hin und zurück)	15 t (einseitig)	6,0 m/s	n. v.	
Lange Gerade (hin und zurück)	40 t	6,0 m/s	n. v.	
Referenzzyklus	0 t	4,5 m/s	2,0 m/s	
Referenzzyklus	15 t (einseitig)	4,5 m/s	2,0 m/s	
Referenzzyklus	40 t	4,5 m/s	2,0 m/s	
Referenzzyklus	0 t	6,0 m/s	3,0 m/s	
Referenzzyklus	15 t (einseitig)	6,0 m/s	3,0 m/s	
Referenzzyklus	40 t	6,0 m/s	3,0 m/s	

Beim Referenzzyklus handelt es sich um die Kombinationen von Geraden sowie Rechts- und Linkskurven in beiden Fahrtrichtungen, die eine typische Fahrweise im regulären Terminalbetrieb repräsentiert. In **Abbildung 93** ist der Streckenverlauf des Referenzzyklus schematisch dargestellt.



Abbildung 93: Referenzzyklus Testfeld

In **Abbildung 94** sind die Ergebnisse der Geradeausfahrt für das AGV-87 mit Blei-Batteriesystem dargestellt. Darin kommen sehr deutlich die Zusammenhänge zwischen Fahrgeschwindigkeit bzw. der angeforderten Fahrleistung und der Batteriespannung bzw. Fahrstrom zum Vorschein. Es ist eine hohe Wiederholgenauigkeit bei den sechs Fahrten (jeweils hin und zurück) erkennbar.

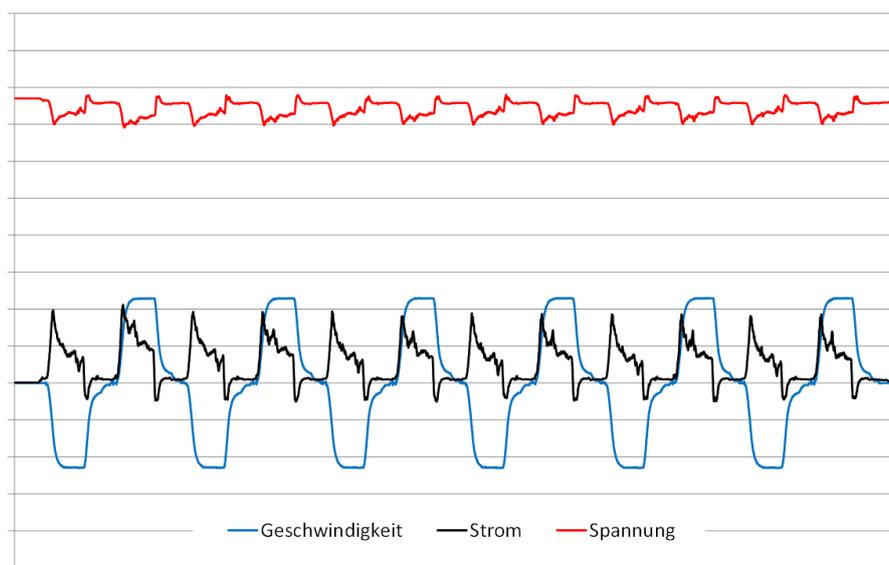


Abbildung 94: Versuchsergebnisse AGV-87 mit Blei-Batteriesystem

In **Abbildung 95** wird beispielhaft die Gegenüberstellung des Blei-Batteriesystems und des Typ 1-Batteriesystems gezeigt. Im direkten Vergleich wird deutlich, dass die Batterieströme bei einem Lithium-Batteriesystem während der Beschleunigung und der Konstantfahrt unter gleichen Lasten geringer ausfallen als bei einem Blei-Batteriesystem. Während der Rekuperationsphase beim Abbremsen hingegen ist der Betrag des Batteriestroms höher, somit kann beim Lithium-Batteriesystem mehr Energie zurückgewonnen werden als bei dem Blei-Batteriesystem. Bei der Betrachtung der Spannung fällt auf, dass die Batteriespannung beim Lithium-Batteriesystem ein deutlich konstanteres Niveau aufweist. Auch während der maximalen Beschleunigung – wenn das Batteriesystem eine hohe Leistung zur Verfügung stellen muss – ist der Einbruch der Spannung nur geringfügig. Dieses Verhalten ist auf den deutlich geringeren Innenwiderstand der Lithium-Batteriesysteme zurückzuführen.

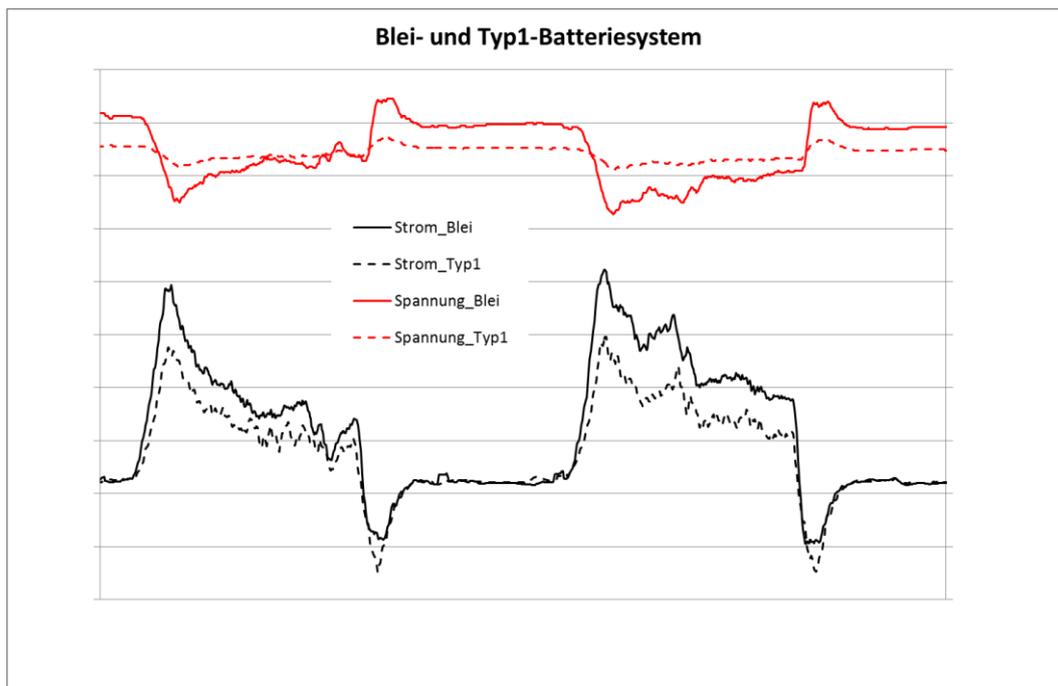


Abbildung 95: Versuchsergebnisse AGV-87 mit Blei-Batteriesystem sowie Typ 1-Batteriesystem, Vergleich Strom und Spannung

Parallel dazu wurden die Energieaufnahmen mit allen drei im BESIC-Projekt betrachteten Batteriesystemtypen in drei ausgewählten Messfahrten miteinander verglichen. Hierbei handelte es sich um die Geradeausfahrt ohne Zuladung mit einer Fahrtgeschwindigkeit von 4,5 m/s, einer Fahrtgeschwindigkeit von 6 m/s sowie der Referenzfahrt, bei der in verschiedenen Richtungen neben einer Geradeausfahrstrecke auch Kurven gefahren werden. In diesen Vergleich sind ebenfalls jeweils sechs Messfahrten eingegangen. Es zeigt sich hierbei für beide Lithium-Batteriesysteme, dass die Energieaufnahme des B-AGV bei gleichen Fahranforderungen deutlich unterhalb der Energieaufnahme bei Verwendung eines Blei-Batteriesystems liegt. Bei der Geradeausfahrt mit den unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten konnten mit den Lithium-Batteriesystemen Energieeinsparungen von bis zu 31 % gegenüber dem Blei-Batteriesystem erzielt werden. Bei dem Referenzzyklus, der von seiner Charakteristik her mit Kurven und Richtungswechseln eher mit einem realen Einsatzszenario im Hafen vergleichbar ist, konnten immerhin noch Einsparungen von 15 % beim Typ 1-Batteriesystem bzw. 17 % beim Typ 2-Batteriesystem gegenüber dem Blei-Batteriesystem erzielt werden. Die etwas geringere Differenz kann damit erklärt werden, dass bei der Kurvendurchfahrt geringe Fahrtgeschwindigkeiten vorliegen und hierfür weniger beschleunigt sowie verzögert werden muss (siehe **Abbildung 96**).

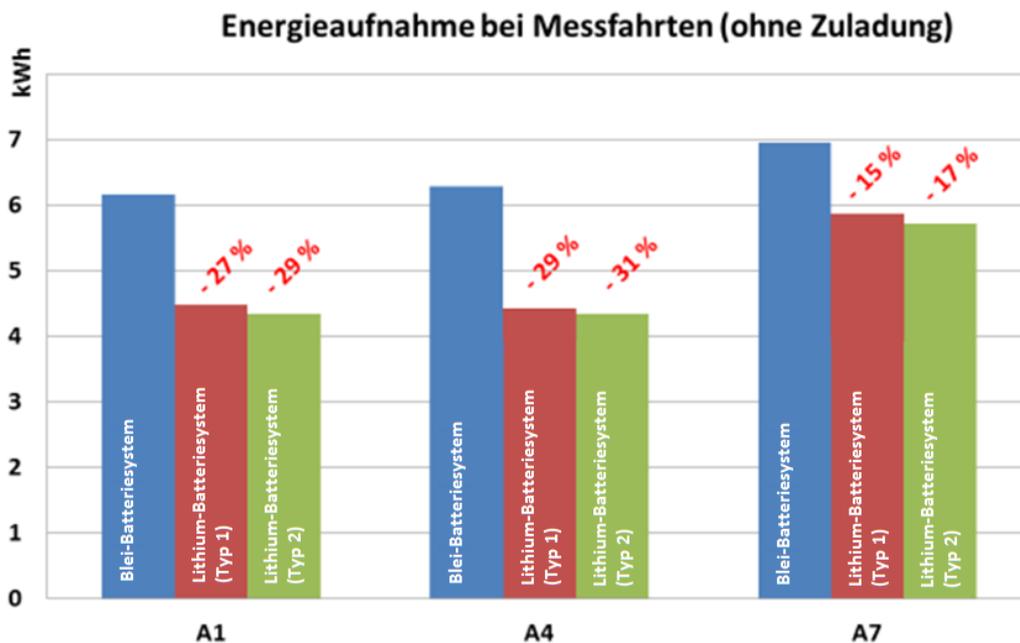


Abbildung 96: Energieaufnahme bei Messfahrten ohne Zuladung

Die gleichen Messfahrten wurden auch mit einer Zuladung von 40 t durchgeführt. Da der relative Gewichtsvorteil der Lithium-Batteriesysteme bei einem Fahrzeug mit Zuladung geringer ausfällt, reduzierten sich auch die ermittelten Einsparungen bei der Energieaufnahme entsprechend. Anhand der Testfahrten konnte die grundsätzliche Annahme jedoch bestätigt werden, dass durch eine Verwendung von Lithium-Batteriesystemen anstelle von Blei-Batteriesystemen nennenswert Energie eingespart werden kann.

4.3 Erprobung von Wechselbatterien auf Basis von Lithium-Batteriesystemen im Feld

4.3.1 Installation des Ladeplatzes für Lithium-Batteriesysteme

Nachdem die Inbetriebnahme und Testfahrten mit dem Ladecontainer am Werksstandort in Düsseldorf erfolgt waren, wurde dieser wie auch das AGV-87 mit den Lithium-Batteriesystemen nach Hamburg zum Container Terminal Altenwerder (CTA) gebracht. Dort wurde der neue Ladegerätcontainer auf die bereits bestehenden Ladegerätcontainer für die Blei-Batteriesysteme aufgesetzt und angeschlossen. Weiterhin wurde der Ladeplatz „1-6“ (kurz für den Ladeplatz in Spalte 1 und Ebene 6 des Hochregallagers) im Regal für die Lithium-Batteriesysteme reserviert und die passende Ladegeräteeinheit elektrotechnisch und signaltechnisch mit der dortigen Multikupplung verbunden (siehe **Abbildung 97**).



Abbildung 97: Erweiterung der Batteriewechselstation (BWS) um eine Ladegeräteinheit für die Lithium-Batteriesysteme

Mit der Integration der neuen Ladegeräteinheit für die Lithium-Batteriesysteme wurde auch die Steuerungsarchitektur des Gesamtsystems erweitert. Die Ladegeräteinheit wird wie auch die Ladegeräteinheiten für die Blei-Batteriesysteme über die sogenannte BESC (engl. Battery Exchange Station Controller) angesprochen. Hierbei handelt es sich um eine SPS als übergeordnete Steuerung der gesamten Batteriewechselstation, die den jeweiligen Ladegeräteinheiten über Hardwarekontakte den Start- und Stopfbefehl sendet. Der Zustand des Ladeplatzes (z.B. Batterie ist mit Ladegerät verbunden, Batterie wird geladen, Batterie voll,...) wird ebenfalls über Hardwarekontakte rückgemeldet. Um diese Funktionalität auch für den Ladeplatz der Lithium-Batteriesysteme zu gewährleisten, musste die BESC durch Terex entsprechend angepasst werden.

Die Steuerung der Ladegeräteinheit für die Lithium-Batteriesysteme sowie die elektrische Verschaltung wurden hinsichtlich der Einbindung in den Automatikbetrieb durch Terex angepasst. Hierzu wurde eine zusätzliche Kleinsteuerung („Easy-SPS“) integriert, die in Kombination mit zusätzlichen Relais die 24V-Versorgung und das Zündungssignal des batterieseitigen BMS nach Einsetzen der Batterie ins Regal einschaltet und nach erfolgter Fertigladdung vor einem anstehenden Batteriewechsel wiederum abschaltet. Diese Maßnahme war erforderlich, damit die Multikupplung beim Batteriewechsel nicht unter Last getrennt oder geschlossen wird. Hierzu war zudem auch eine Anpassung der Verdrahtung innerhalb des Ladecontainer erforderlich.



Easy-SPS und Relais von Terex

SPS S7 von Akasol

Abbildung 98: Steuerungen der Ladegeräteinheit für die Lithium-Batteriesysteme

Die Grundlage dieser Anpassungsarbeiten war eine Überprüfung des Signalverlaufs beim Durchlaufen der Schrittketten der Ladegeräteinheit, die durch den Hersteller nicht ausreichend dokumentiert waren. Hierbei wurden sämtliche Signale und Zustände der Ladegeräteinheit in allen betrieblichen Situationen zunächst überprüft. Diese Erkenntnisse flossen dann in die Programmierung der zusätzlichen Steuerung ein. Es wurden auch mögliche Sonderfälle überprüft, die ebenfalls störungsfrei durchlaufen müssen (bspw. Ladegerät ist zunächst ausgeschaltet und wird dann in den Standby geschaltet; Batterie ist in dieser Situation verbunden oder nicht).

	Schnittstelle LG-Batt.	potentialfreie Kontakte					
		Ladeleistung	CAN-Bus	Laden K25-27	Fertig/Voll K28	Störung K29	Gestoppt K30
Von AKASOL beschriebene Abnahmeprozedur	Detaillierte Beschreibung des Signalverlaufs						
Automatisiertes Laden							
(0. Ladegerät komplett ausgeschaltet)	LG, S7 und 24 V Aus	0	0	0	0	AUS	0
1. Ladegerät komplett eingeschaltet, Der BuB aus; Keine Perifereinschlüsse belegt; Batterie nicht verbunden (Interlock offen)	LG Standby, keine Batterie	0	0	0	0	AUS	0
2. Batterie (Akasol) über Interlock anschließen (S7 erkennt die Batterie, Die 24V werde zugeschaltet)	LG Standby, Batterie verbunden	0	Verbunden	0	0	AUS	0
3. Ein Startbefehl über den potenzialfreien Kontrakt geben; Das Ladegerät schließt das Hauptschütz des AIC (DC Zwischenkreis) die Ladung beginnt mit 250kW	Startsignal	>0	Verbunden	1	0	AUS	0
4. Die Batterie wird bis 90% SOC geladen; Die Leistung wird auf 0W reduziert;	Ladeende erreicht	ca. 0	Verbunden	0	1	AUS	0
5. Die Batterie wartet mit 0W Sollwert, bis über den potenzialfreien Kontakt der Stopp-Befehl kommt;	Stoppsignal	0	Verbunden	0	k.A.	AUS	1
6. Nach erkennen des Stopp-Signals über den potenzialfreien Kontakt. Schaltet das Hauptschütz des AIC (Gleichstromzwischenkreis) ab. 24V bleiben eingeschaltet							
7. Interlock öffnen							
8. 24V werden abgeschaltet							
9. Batterie kann entnommen werden							
10. Batterie entnommen, Ladegerät wartet auf neue Batterie	LG Standby, keine Batterie	0	0	0	0	AUS	k.A.
Entladen über BuB:							
Zues Automatisiertes Laden nach Entladung							
1. Ladegerät komplett eingeschaltet, Der BuB aus; Keine Perifereinschlüsse belegt; Batterie nicht verbunden (Interlock offen)	LG Standby, keine Batterie	0	0	0	0	AUS	0
2. Batterie (Akasol) über Interlock anschließen (S7 erkennt die Batterie, Die 24V werde zugeschaltet)	LG Standby, Batterie verbunden	0	Verbunden	0	0	AUS	0
3. Ein Startbefehl über den potenzialfreien Kontrakt geben; Das Ladegerät schließt das Hauptschütz des AIC (DC Zwischenkreis) die Ladung beginnt mit 250kW	Startsignal	>0	Verbunden	1	0	AUS	0
4. Die Batterie wird bis 90% SOC geladen; Die Leistung wird auf 0W reduziert;	Ladeende erreicht	ca. 0	Verbunden	0	1	AUS	0
5. Die Batterie wartet mit 0W Sollwert, bis über den potenzialfreien Kontakt der Stopp-Befehl kommt;	Stoppsignal	0	Verbunden	0	k.A.	AUS	1
6. Nach erkennen des Stopp-Signals über den potenzialfreien Kontakt. Schaltet das Hauptschütz des AIC							

Abbildung 99: Ausschnitt aus einer Tabelle mit Testprozeduren und Signalverläufen

Weiterhin wurde die Steuerung des Regalbediengerätes durch Terex angepasst. Die Lithium-Batteriesysteme weisen mit ca. 4 t ein deutlich geringeres Gewicht als die Blei-Batteriesysteme mit ca. 11 t auf. Dies führt zu einem veränderten Einfederungsverhalten des B-AGV und erfordert eine Anpassung der Hubhöhen während eines Batteriewechselvorgangs.

Das Regalbediengerät verfügt über eine Lasterkennung. Auch die Interpretation der erfassten Last war in der Steuerung für den Batteriewechselfall mit den Lithium-Batteriesystemen anzupassen, da geringe Hubmassen sonst fehlerhaft interpretiert werden, was zu einem Abbruch des Batteriewechsels führen würde. Zu berücksichtigen war des Weiteren die geringere Durchbiegung des Arms des Regalbediengeräts bei der Aufnahme eines Lithium-Batteriesystems im Vergleich zum Blei-Batteriesystem.

Eine weitere Anpassung betrifft die Lagerverwaltung. Die Lithium-Batteriesysteme dürfen nur auf den Ladeplatz „1-6“ gesetzt werden und auf Regalplätze ohne angeschlossene Ladegeräteeinheiten. Weiterhin dürfen die Lithium-Batteriesysteme nur in dem dafür vorgesehenen Containertransporter AGV-87 eingesetzt werden.

4.3.2 Inbetriebnahme des Gesamtsystems aus AGV, Li-Ion-Batterien, Ladegerät und Batteriewechselstation

Nach den im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Änderungen an den Teilsystemen konnte die Inbetriebnahme des Gesamtsystems starten.

Bei dem Typ 1-Batteriesystem funktionierten der Batteriewechsel und der anschließende Fahrbetrieb von Beginn an weitgehend störungsfrei. Somit konnte das dedizierte Fahrzeug (AGV 87) mit diesem Batteriesystem direkt im Terminalbetrieb verwendet werden. Bei diesem Batteriesystem traten jedoch insbesondere an kalten Wintertagen Probleme mit dem automatisierten Ladevorgang auf. Diese äußerten sich in immer wieder auftretenden Unterbrechungen des Ladevorgangs aufgrund der temperaturabhängigen Eigenschaften der Zellen. Seitens des Herstellers wurde ein entsprechender Workaround innerhalb des Batterie-Management-Systems geschaffen, so dass dieses Problem umgangen werden konnte.

Beim Typ 2-Batteriesystem erfolgte zu Beginn der Inbetriebnahme eine Umstellung der Berechnung des Ladezustands von spannungsbasiert auf Ah-basiert. Hierdurch konnten Schwankungen des SOC während des Ladevorgangs und des Entladevorgangs vermieden werden. Nach der Umstellung war eine deutlich bessere Ausnutzung der Batteriekapazität möglich. Nachdem auch Signalverläufe bzw. Meldungen angepasst worden waren, die einen automatisierten Ladevorgang zunächst verhindert hatten, funktionierte dann der automatisierte Ladevorgang dieses Batteriesystems.

Als Herausforderung stellte sich der automatisierte Batteriewechsel mit zwei unterschiedlichen Batteriesystemen heraus. Es mussten zunächst alle Systemparameter so eingestellt werden, dass das Gesamtsystem mit den Eigenschaften beider Batteriesysteme kompatibel war, die in einigen Fällen doch deutlich voneinander abwichen. Angepasst werden mussten sowohl die Fahrzeugsteuerung als auch das AGV-Managementsystem und das BVS.

Nachdem die Inbetriebnahme abgeschlossen werden konnte, wurde das System mit beiden Batteriesystemen in den Flottenbetrieb überführt. Die bei der Inbetriebnahme und dem anschließenden Flottenbetrieb aufgetretenen Störungen und Fehler haben zu einem erheblichen Erkenntniszugewinn über Lithium-Ionen-Batterien geführt. Das System hat in erheblichem Umfang Fahrten auf dem Testfeld von CTA durchgeführt und wurde auch wiederholt im Flottenversuch auf dem Terminal eingesetzt, sodass aussagekräftige Betriebsdaten gesammelt werden konnten.

Die Daten aus einem in das AGV integrierten Datalogger wurden durch Terex ausgewertet und mit den Betriebsdaten eines mit Blei-Säure-Batterie betriebenen AGVs verglichen. Zum Vergleich wurde jeweils ein Tag genommen, an dem für das AGV ein ähnlicher Fahranteil sowie eine ähnliche Außentemperatur vorgelegen hat. Bei diesen ähnlichen Randbedingungen konnten sowohl mit dem Typ 1-Batteriesystem als auch mit dem Typ 2-Batteriesystem eine gegenüber den Blei-Säure-Batteriesystemen um ca. 20 % verringerte durchschnittliche Leistungsaufnahme bei der Fahrt festgestellt werden. Weiterhin hat sich auch in diesen Daten gezeigt, dass auch unter Last bei Li-Ion eine sehr konstante Spannungslage vorliegt. Weiterhin ergeben sich auch bei vergleichbarer Zuladung und ähnlichen Fahrmanövern auf dem Terminalgelände gegenüber den Blei-Batteriesystemen deutlich

reduzierte Ströme. Diese Ergebnisse aus dem Terminalbetrieb bestätigen auch die Ergebnisse der Testfahrten auf dem Testfeld bei Terex im Düsseldorf.

4.3.3 Auswertung von Batteriesysteminformationen aus der Felderprobung

Neben dem Datalogger erfolgte auch eine Datenaufzeichnung auf den Batterien selbst, die zu diesem Zweck mit Speicherkarten bzw. USB-Sticks ausgestattet sind. Die Daten des Typ 1-Batteriesystems konnten dem EFZN in Clausthal zur Auswertung bereitgestellt werden. Die aufgezeichneten Daten reichen dabei bis in den Dezember 2014 zurück, der Übergabe des Batteriesystems zur Fahrzeugintegration, zurück, so dass ebenfalls die Inbetriebnahme- und Erprobungsfahrten aufgezeichnet worden. Für einen ersten Vergleich zur bisher vorherrschenden Blei-Technologie wurde sich jedoch zunächst auf die Auswertung repräsentativer Einsätze am Containerterminal konzentriert.

Die erste Einsatzfahrt im Feld ist am 22.07.2015 zu verzeichnen, wobei ein Fahranteil von 32 % vorlag und sich das Fahrzeug rund drei Stunden im Einsatz befand. Die Batteriekapazität sank dabei lediglich von 90 % auf 80 % des Ladezustands, so dass auch eine längere Fahrzeit möglich gewesen wäre. Die bisher längste Einsatzzeit des Batteriesystems vom Typ 1 liegt bei rund 28 Stunden, was durch einen moderaten Fahranteil von 8 % und Standzeiten von bis zu 13 Stunden am 27.11.2015 zu erklären ist. Für den Vergleich der Lithium-Technologie zur Blei-Technologie wurde ein exemplarisch ausgewähltes Fahrprofil vom 31.03.2016 herangezogen, da es mit einem Fahranteil von 32 % und einer Einsatzzeit von 12,5 Stunden vergleichbar zu den bekannten Datensätzen der Blei-Batterien ist. Das genannte Fahrprofil ist in **Abbildung 100** veranschaulicht.

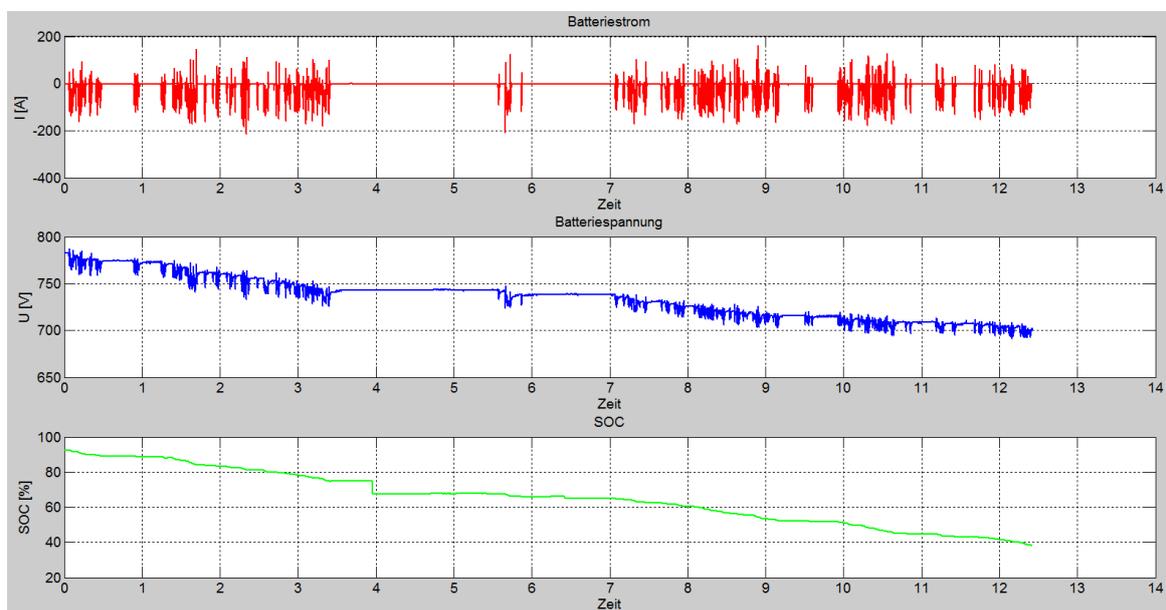


Abbildung 100: Fahrprofil vom 31.03.2016 mit Verwendung des Typ 1-Batteriesystems

Aus dem dargestellten Fahrprofil wird ersichtlich, dass die Lithium-Batteriesysteme derzeit wie die Blei-Batteriesysteme eingesetzt werden. Auch hier erhält das AGV bei einem Ladezustand der Batterie von 40 % einen Befehl zum Batteriewechsel. Für die Blei-Batterien wurde diese Schwelle als Schutz vor Tiefentladung gewählt und zur Erprobung der Systeme zunächst auch für die Lithium-Batterien beibehalten. Bei diesen könnte jedoch auch die gesamte Kapazität genutzt werden, da Lithium-Batteriesysteme auch in niedrigen Ladezustandsbereichen eine deutlich bessere Zyklenstabilität aufweisen. Im Falle des Fahrprofils vom 31.03.2016 verfügte das Batteriesystem Typ 1 beim Batteriewechsel über eine Restkapazität von 100 Ah, was bei einem gemittelten Kapazitätsverbrauch von 11,9 Ah pro Betriebsstunde eine Verlängerung der Fahrzeit um rund 8 Stun-

den möglich machen würde. Es zeigt sich somit, dass Lithium-Batteriesysteme trotz ihrer deutlich geringeren Kapazität eine ähnliche Fahrzeit wie Blei-Batteriesysteme ermöglichen können. Des Weiteren wies das Lithium-Batteriesystem Typ 1 einen – im Vergleich zur Blei-Technologie – um 20 % geringeren Energieverbrauch auf, wodurch die ersten Ergebnisse der Inbetriebnahme des Fahrzeugs bestätigt werden konnten. Die Begründung hierfür ist in der deutlich geringeren Masse der Lithium-Batteriesysteme und der höheren Rekuperationsleistung zu sehen.

Ein weiterer Vorteil der Lithium-Technologie liegt in der deutlich höheren möglichen Ladeleistung und der damit einhergehenden Verkürzung der Batterie-Liegezeiten. Die im Anschluss an das in **Abbildung 100** gezeigte Fahrprofil folgende Ladung des Batteriesystems Typ 1 benötigte lediglich 45 Minuten, so dass das Batteriesystem in weniger als einer Stunde wieder einsatzbereit war. Im Vergleich dazu liegt die durchschnittliche Ladedauer der Blei-Batterien im Bereich von 6 Stunden. Diese „Schnellladefähigkeit“ bietet die Möglichkeit die Batteriekapazität der Lithium-Batteriesysteme noch weiter zu verringern und somit die Nachteile im Bereich der Investitionskosten zu reduzieren. Des Weiteren würde eine Reduzierung der Batteriekapazität zu einem gesteigerten Kapazitätsdurchsatz führen, da die Batteriesysteme häufiger entladen und geladen werden und nur so das Potenzial ihrer hohen Zyklenfestigkeit und Lebensdauer ausnutzen können. Zusätzlich dazu ließe sich durch die schnellere Einsatzbereitschaft der Lithium-Batteriesysteme auch die Vorhaltung von Wechselbatterien reduzieren, was zu einer weiteren Verbesserung der Wirtschaftlichkeit führen könnte. Zusammengefasst scheint sich die Lithium-Technologie bereits heute gegenüber der Blei-Technologie wirtschaftlich rechnen zu können. Voraussetzung hierfür ist jedoch die Ausnutzung aller aufgezeigten Potenziale / Vorteile dieser Technologie.

4.4 Untersuchung der Degradation der Lithium-Batteriesysteme auf Modulebene

4.4.1 Untersuchung Temperaturverhalten

Das Temperaturverhalten stellt einen entscheidenden Einflussfaktor für die Degradation von Lithium-Batteriesystemen dar, so dass dieses für beide im BESIC-Projekt beschafften Batteriesystemtechnologien hinreichend untersucht wurde. Hier kommt noch hinzu, dass das Modul vom Typ 1-Batteriesystem über eine forcierte Flüssigkeitskühlung verfügt, während das Modul vom Typ 2-Batteriesystem über keinerlei Kühlung verfügt. Aus diesem Grund wurde das Typ 1-Modul zuerst ungekühlt und anschließend mit Flüssigkeitskühlung betrieben. Im ersten Versuch war die Kühlung abgeschaltet und auch die Kühlflüssigkeit aus dem Modul entfernt; die Kühlflüssigkeit hätte womöglich die Wärmekapazität des Moduls verfälscht. In der Konstantstromphase nimmt die gemessene Temperatur von etwa 27 °C Eingangstemperatur bis zu einer Höchsttemperatur von 34 °C zu. Wie in **Abbildung 101** zu sehen, sinkt die Temperatur in der Konstantspannungsphase nach ihrem Höchstwert allmählich wieder ab. Als Endtemperatur sind etwa 33,5 °C festzustellen.

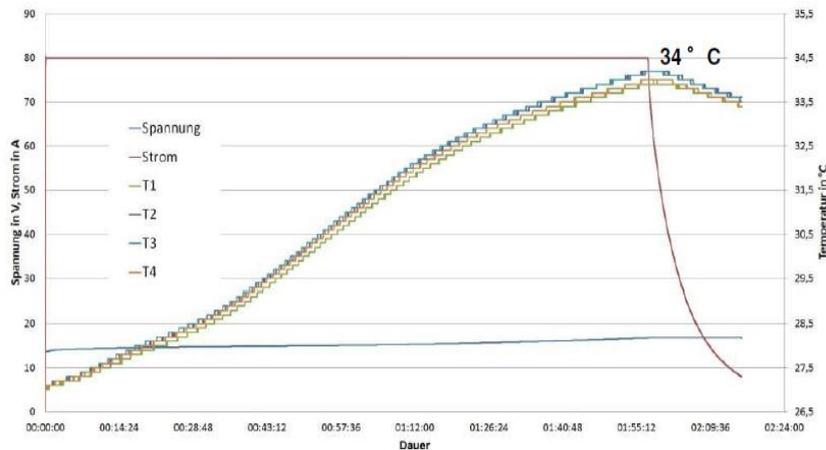


Abbildung 101: Ladung Modul Typ 1 ohne Kühlung bei C/2

Für den zweiten Versuch wurde das Typ 1-Modul wieder mit Kühlflüssigkeit befüllt und an den Rückkühler angeschlossen. Die Kühlmitteltemperatur wurde dabei auf die Umgebungstemperatur von 27 °C geregelt, so dass das Modul lediglich mit der Umgebungstemperatur arbeitete, ähnlich wie dies im Fahrzeug in der Praxis vorgesehen ist. Wie es in **Abbildung 102** ersichtlich ist, fällt der Temperaturanstieg im Versuch mit Wasserkühlung zunächst sehr übereinstimmend mit dem Versuch ohne Wasserkühlung aus. Die Eingangstemperatur liegt bei etwa 27 °C und nach etwa einer Stunde werden 29 °C erreicht. Anschließend zeigt offenbar das Kühlsystem seine Wirkung und kann die Temperatur gegen Ende der Konstantstromphase sogar um wenige Zehntel eines Grads zurückführen. In der Konstanzspannungsphase wird die Temperatur aufgrund aktiver Kühlung wiederum deutlich abgesenkt. Als Ausgangstemperatur sind etwa 27,5 °C festzustellen.

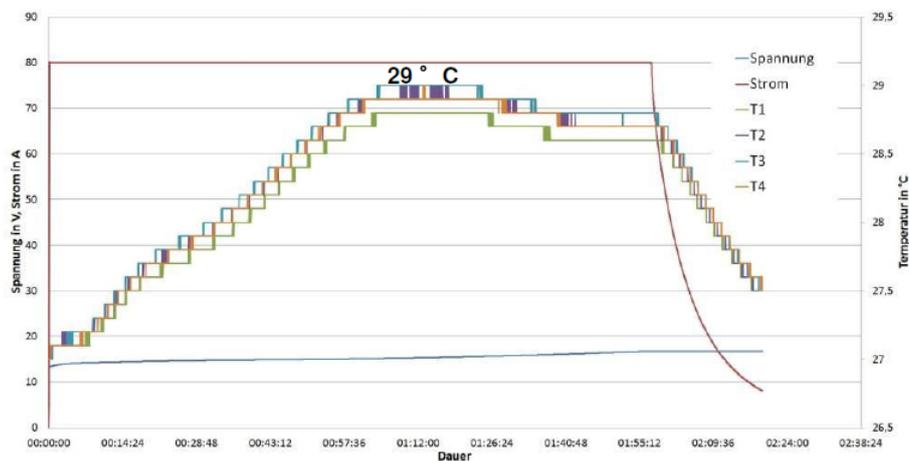


Abbildung 102: Ladung Modul Typ 1 mit aktiver Kühlung bei Ladung mit 1/2 C (Kühlmitteltemperatur betrug 27°C)

Es zeigt sich, dass mit eingeschalteter Kühlung eine um rund 5 °C niedrigere Maximaltemperatur erreicht wurde, gleichwohl die Temperatur des Kühlmittels lediglich auf die Umgebungstemperatur geregelt wurde. Des Weiteren verteilen sich die vier im Modul gemessenen Temperaturen mit eingeschalteter Kühlung homogener. Für abgebildeten Ladeverlauf beträgt der Unterschied der Temperaturmesswerte zwar auch nur 0,4 °C; weitere Untersuchungen zeigten jedoch, dass die Temperaturen beim Zyklisieren weiter auseinander driften. Bei eingeschalteter Kühlung betrug der Messwertunterschied hingegen nie mehr als 0,4 °C. Dies ist von Vorteil, da eine homogene Temperaturverteilung ebenfalls zu einer homogenen Alterung führt.

Bei der Untersuchung des Temperaturverhaltens während der Ladung vom Typ 2-Modul zeigt die in **Abbildung 103** dargestellte Messwertkurve einen nahezu geradlinigen Temperaturanstieg. Die Eingangstemperatur beträgt etwa 29 °C. In der Konstantstromphase nimmt die Temperatur allmählich zu und erreicht gegen Ende den Höchstwert von 36 °C. Da die anschließende Konstantspannungsphase zeitlich äußerst knapp ausfällt, ist darin kein Rückgang der Temperaturmesswerte ausmachen.

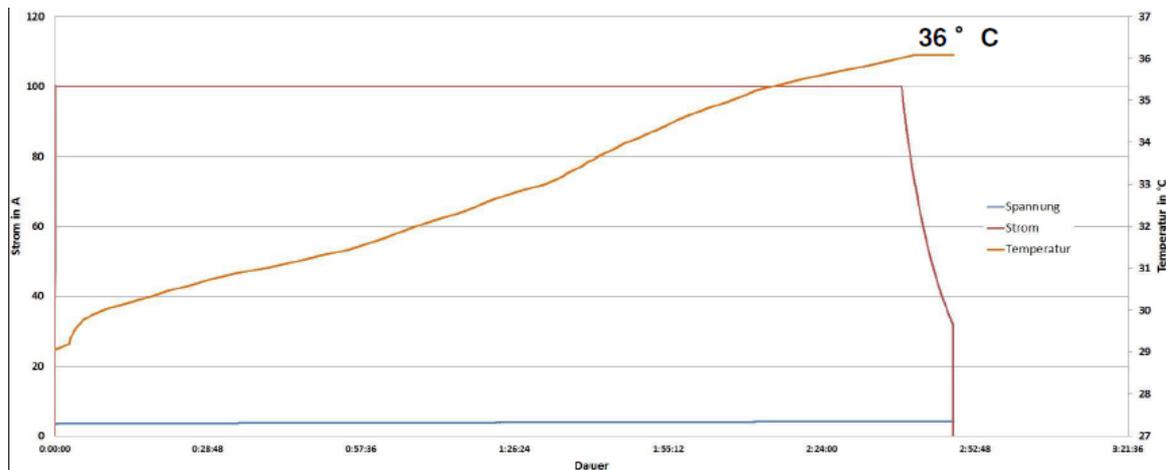


Abbildung 103: Ladung Modul Typ 2 bei Ladung mit $\frac{1}{5}$ C

Insgesamt lässt sich ein Temperaturanstieg von 7 °C bei moderater Laderate erkennen. Das Modul vom Typ 2 zeigt somit während der Ladung aufgrund der fehlenden aktiven Kühlung einen höheren Temperaturanstieg als das Vergleichsmodul vom Typ 1.

4.4.2 Untersuchung der Kapazitätsabnahme

Die Degradationsuntersuchungen der verschiedenen Lithium-Technologien werden nunmehr vornehmlich auf Modulebene erfolgen. Hierzu wurde ein mögliches Testprofil erstellt, welches auf Fahrdaten der Containertransporter mit Blei-Batteriesystemen (Prototypen-Fahrzeuge) zurückzuführen ist. Zutreffender kann das Fahrprofil eher als „Standprofil“ bezeichnet werden, da die Auswertung erster Fahrdaten ergab, dass die Strombelastungen auf die Batteriesysteme im Feld eher als gering einzuschätzen sind. Die Fahrdaten weisen bisher lediglich geringe Dauerströme und nur kurzzeitig hohe Stromamplituden auf. Die Höhe der Stromamplituden ist dabei abhängig von der Zuladung von Containern und resultiert aus den Anfahrströmen der Fahrzeuge. Bei der Auswertung der Daten ergaben sich maximale Anfahrströme in Höhe von 357A, welche im Bereich des Nennstromes der Batteriesysteme liegen. Das für die Labortests vorgesehene Testprofil hatte daher den in **Abbildung 104** dargestellten Verlauf.

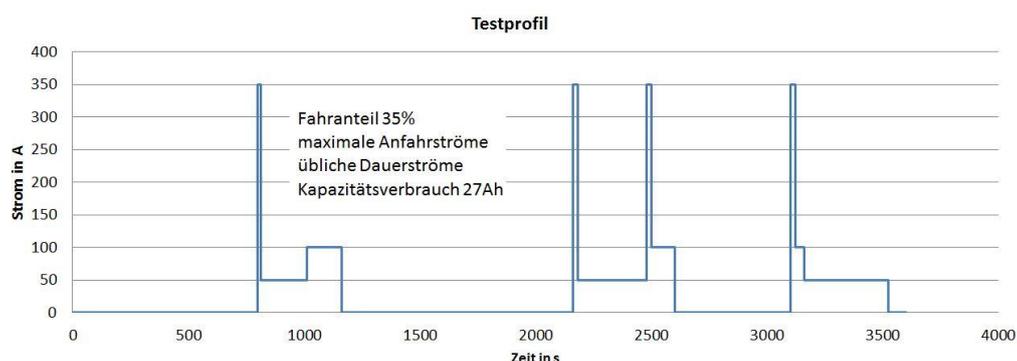


Abbildung 104: erstes Testprofil für Modultests zur Degradationsuntersuchung

Im Zuge der ersten Untersuchungen musste jedoch festgestellt werden, dass das vorgesehene Testprofil zwar hinreichend genau die Feldumgebung widerspiegelt, jedoch zu geringe Belastungen aufweist, um die Module merklich altern zu lassen. Bei beiden Modulen wären ca. zehn dieser Zyklen nötig, um die Module einmal vollständig zu entladen, da dieses Profil auf Grund der hohen Standzeiten einen sehr geringen Kapazitätsverbrauch beinhaltet. Bezieht man eine „normale“ einstündige Ladung mit ein, so ließen sich pro Tag maximal zwei Vollzyklen im Laborbetrieb realisieren. Da gemäß der bisherigen Erfahrungen im Bereich von Lithium Batterien eine deutlich erkennbare Alterung erst bei etwa 500-1000 Vollzyklen beginnen wird ist dieses Testprofil somit nicht geeignet.

Im Allgemeinen wird derzeit davon ausgegangen, dass die Batteriesysteme im Feld sehr wahrscheinlich eher einer kalendarischen Alterung unterliegen werden. Dies liegt zum einen an der bereits erwähnten geringen „Fahrbelastung“, zum anderen gibt es nur ein Lithium-Fahrzeug. Das heißt, es wird immer nur ein Batteriesystem im Betrieb sein, während das andere Batteriesystem in der Ladestation verweilt. Betrachtet man die hohen Energieinhalte der beiden Batteriesysteme, so ist es durchaus denkbar, dass mit den Lithium-Systemen Fahrzeiten von bis zu 24h möglich erscheinen, wodurch die jeweils nicht genutzte Batterie eine ebenso lange Standzeit ereilt. Dabei wird die Alterung massiv vom Ladezustand und den äußeren Bedingungen abhängen, welche derzeit nur vermutet werden können und später aus den realen Daten der Felderprobung ermittelt werden sollen. Diese Faktoren sprechen für eine überwiegend kalendarische Alterung der Batteriesysteme.

Zusätzlich wird es jedoch auch im Betrieb der Batteriesysteme Faktoren geben welche sich negativ auf die Lebensdauer auswirken werden, so sind beispielsweise hohe Stromänderungen bei sehr hohen oder sehr niedrigen Ladezuständen degradationsfördernde Faktoren bei Lithium-Batteriesystemen. Da für die kalendarische Alterung schon Vorarbeiten im Bereich der Lithium-Zellen vorhanden sind und die Betriebsbelastungen der Batterien aus den Felddaten gewonnen werden sollen, erscheint derzeit die Degradationsuntersuchung auf Basis eines ereignisbasierten Modells als am sinnvollsten.

Um die betriebsbedingte Alterung der Module zu erfassen, wurden diese mit definierten Entladetiefen zyklisiert. Da für das Modul vom Typ 1 bereits eine Wöhlerkurve (Entladetiefe über äquivalenten Vollzyklen) vorliegt, wurde dieses mit einem Strom von $\frac{1}{2}$ C und einem Entladehub von 50 % betrieben. Die Temperatur des Kühlmittels wurde dabei auf 23 °C (Raumtemperatur) eingestellt und permanent umgewälzt. In **Abbildung 105** sind die Zwischenergebnisse der Kapazitätsbestimmung für das Typ 1-Modul gegenüber der Anzahl äquivalenter Vollzyklen aufgetragen. Zu Beginn der Zyklisierung konnte eine entnehmbare Kapazität von 160,02 Ah ermittelt werden, was im Vergleich zu der vom Hersteller angegebenen Nennkapazität 100,64 % entspricht. Im Zuge der durchgeführten Dauertests konnten mit dem Typ 1-Modul bereits 600 äquivalente Vollzyklen durchgesetzt werden, wobei die entnehmbare Kapazität noch immer 159,8 Ah (also 100,5 %) entspricht. Durch lineare Extrapolation war zu ermitteln, dass bis zum Lebensdauerende (von 80 % entnehmbarer Kapazität) rund 11.000 äquivalente Vollzyklen absolviert werden können.

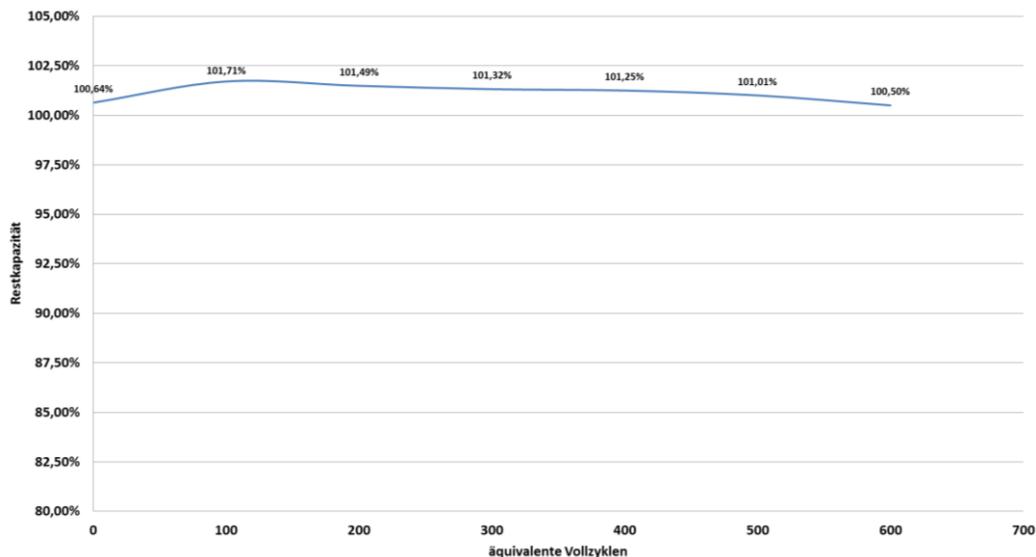


Abbildung 105: Restkapazität über umgesetzten äquivalenten Vollzyklen Modul Typ 1 bei 50 % Entladetiefe und Ladung mit $\frac{1}{2}$ C

Das Modul vom Typ 2 wurde mit einem Strom von $\frac{1}{3}$ C und einem Entladehub von 80 % betrieben, wobei zunächst keine Klimatisierung vorgesehen war. Im Zuge der Dauertests zeigte sich jedoch dass die Zyklisierung aufgrund zu hoher Temperaturen mehrfach pausiert werden musste, so dass auch dieses Modul in einem Klimaschrank bei 20 °C betrieben wurde. In **Abbildung 106** sind die Zwischenergebnisse der Kapazitätsbestimmung für das Typ 2-Modul gegenüber der Anzahl äquivalenter Vollzyklen aufgetragen. Zu Beginn der Zyklisierung konnte eine verfügbare Kapazität von 257,33 Ah ermittelt werden, was im Spannungsbereich des Fahrzeugs einer Nennkapazität 100,00 % entspricht. Bisher konnten mit dem Modul 310 äquivalente Vollzyklen realisiert werden, wobei eine aktuelle Restkapazität von 240 Ah verzeichnet werden kann. Dies entspricht einer Restkapazität von 93,58 %. Durch lineare Extrapolation war festzustellen, dass das Ende der Lebensdauer vom Modul Typ 2 bei rund 1.200 Zyklen erreicht wird.

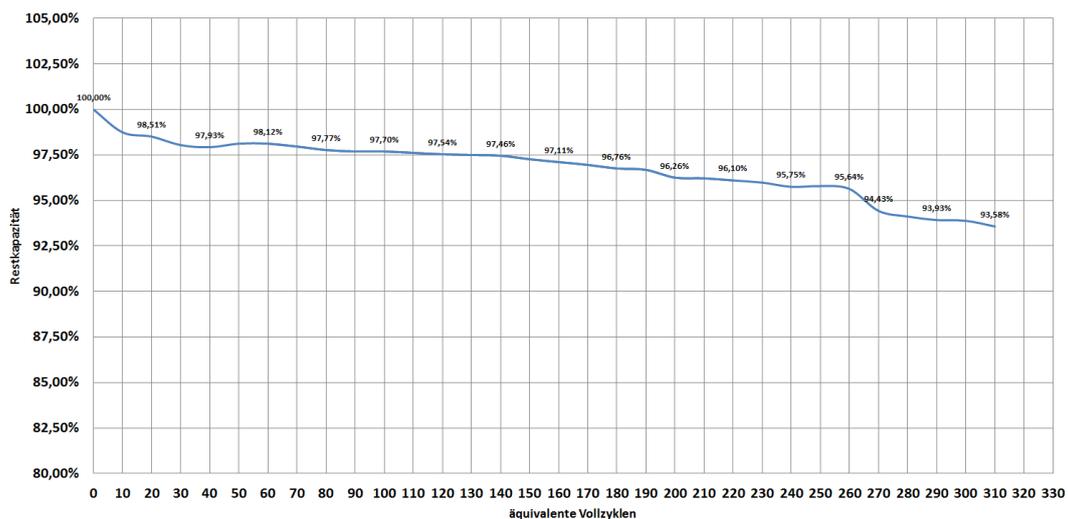


Abbildung 106: Restkapazität über umgesetzten äquivalenten Vollzyklen Modul Typ 1 bei 80 % Entladetiefe und Ladung mit $\frac{1}{3}$ C

Ein zweites Modul vom Typ 2 wurde ebenfalls mit einem Strom von $\frac{1}{3}$ C bei einer Temperatur von 20°C zyklisiert, dieses jedoch mit einem Entladehub von 50 % im gesamten zulässigen Spannungsbereich. Zu Beginn der Zyklisierung konnte eine entnehmbare Kapazität von 300,8 Ah festgestellt werden, welche als Referenz von 100% Restkapazität diente. Die aktuell entnehmbare Kapazität beträgt nach 120 äquivalenten Vollzyklen 292,7 Ah, was

einer Restkapazität von 97,29 % entspricht. Bei einer linearen Extrapolation ergibt sich somit eine zyklische Lebensdauer von rund 980 äquivalenten Vollzyklen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 107 dargestellt.

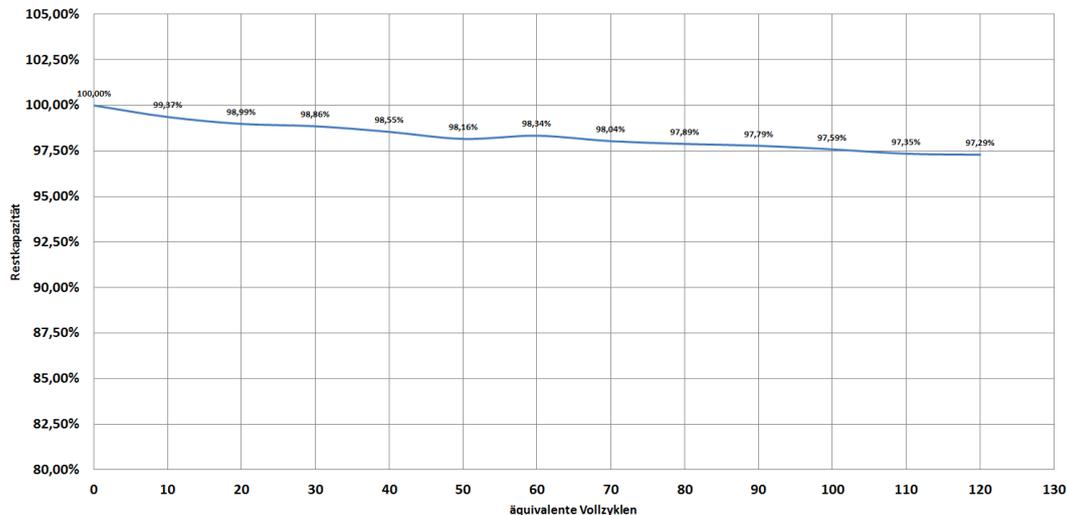


Abbildung 107: Restkapazität über umgesetzten äquivalenten Vollzyklen Modul Typ 2 (Modul 2) bei 50 % Entladetiefe und C/3 Ladung

4.4.3 Erstellung eines Batteriemodells

Die Belastung in einer Lithium-Zelle kann aufgrund physikalischer Prozesse der Degradation als mechanische Beanspruchung zwischen Elektrode und Oberflächenschicht verstanden werden, so dass die aus der Betriebsfestigkeitslehre bekannten Zählverfahren zur Bildung von Kollektiven aus Zeitfunktionen angewendet werden können. Hierfür ist jedoch nicht nur ein grundlegendes Verständnis der Alterungsprozesse im Speichersystem selbst von elementarer Bedeutung, sondern ebenso die Kenntnis über die zu erwartenden Belastungen bzw. Ereignisse während des Fahrbetriebes und der Ruhezeit eines Fahrzeugs. Mit Hilfe von Zählverfahren sollen die in der Felderprobung aufgezeichneten Fahrprofile der Containertransporter mit Lithium-Batteriesystem ausgewertet werden, um Belastungsklassen für das ereignisbasierte Modell zu erstellen. Im Rahmen der Analyse sollen die Strom-, Spannungs-, Temperatur- und Ladezustandsprofile bewertet werden, da nur eine gesamtheitliche Betrachtung aller Größen eine aussagekräftige Bewertung zulässt. Um Schwingungen kleiner Amplitude innerhalb der Belastungsklasse unberücksichtigt zu lassen, wird im Rahmen der Zählung von Kollektiven von Zeitfunktionen eine Rückstellbreite, die auch als Hysterese angesehen werden kann, verwendet. Mit der Rückstellbreite wird erreicht, dass eine Zählung erst dann erfolgt, wenn die zu analysierende Zeitfunktion einen festgesetzten Ausschlag überschreitet, sodass das Messrauschen automatisch unterdrückt und eine gewissen Glättung der Profile erreicht wird. Betrachtet man die pulsförmigen Belastungen der Batteriesysteme von Transportfahrzeugen, so wurde sich aus diesem Grund für lediglich zwei Belastungsklassen entschieden:

	Bezeichnung	Kriterium
I.	Stillstandphase oder stromlose Phase	Falls der Stromwert kleiner als ein vorgegebener unterer Unterscheidungswert ist
II.	Phase mit Fahrbetrieb	Sonstige Stromwerte größer als der Unterscheidungswert

In der Belastungsklasse I wird nur die kalendarische Alterung betrachtet, das heißt die temperatur- und ladezustandsabhängige Alterung der Lithium-Batteriesysteme bei der Lagerung bzw. Nichtbenutzung. In der Belas-

tungsklasse II wird im Gegensatz zu anderen bekannten Ansätzen zur Berechnung der Lebensdauer bzw. zur Bestimmung der Degradation bei zyklischer Beanspruchung die absolute Höhe des Gleichanteils bei einer wechselnden Belastung nicht beachtet. Die Höhe des Gleichanteils wird deshalb nicht explizit berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass die Amplitude nur geringe Auswirkungen auf die Lebensdauer hat, insbesondere dann, wenn die Stromwärmeverluste bei höheren Strömen implizit durch Beachtung der Batterietemperatur als Alterungsparameter berücksichtigt wird. Des Weiteren kann aus der SOC-Änderung auf die Stromamplitude geschlossen werden, da eine schnelle Ladezustandsänderung nur aufgrund eines hohen Stromes hervorgerufen werden kann.

Im Gegensatz zum Gleichanteil wird der überlagerte Wechselstromanteil des Batteriestroms explizit berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass unterschiedliche Stromänderungsraten auch unterschiedliche Belastungen hervorrufen. Für die anstehenden Degradationsuntersuchungen sollen daher die Fahrdaten aus dem Feldtest in einzelne, feste Zeitareale unterteilt werden, wobei jeweils die Ableitung des Stromes nach der Zeit gebildet und in eine Belastungsmatrix eingetragen wird. In Abbildung 108 wird beispielhaft eine Belastungsmatrix dargestellt.

In der Matrix steht die Abnahme der Lebensdauer
in einem Zeitintervall von xy Minuten um xy ppm
der Nennlebensdauer

dI/dt	SOC	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
I<I _{min}		10	8	5	3	2	1	2	3	5	8	10
0		10	8	5	3	2	1	2	3	5	8	10
1A/s		12	10	8	5	3	3	5	8	10	12	15
10A/s		15	12	10	7	5	5	7	10	12	14	17
100A/s		12	10	12	10	8	5	3	3	5	8	10
1000A/s		15	12	10	7	5	5	7	10	12	14	17

Entspricht der
kalendarische
n Alterung bei
SOC=xx%,
T=yy°C

Gesamtlebensdauerverlust ist dann die
Aufsummierung der einzelnen Verluste

Abbildung 108: Lebensdauermatrix

Jeder Stromänderungsrate kann bei verschiedenen Ladezuständen ein gewisser „Lebensdauerverbrauch“ zugeordnet werden. Da die Temperatur den größten Einfluss auf die Degradation von Lithium-Systemen aufweist (vgl. Tabelle 13), ist für diese eine weitere Dimension einzuführen. Für den gesamten Lebensdauerverlust sind im Anschluss die einzelnen Schädigungen aufzusummieren.

Tabelle 14: Einflussgrößen auf die Degradation und deren Wirkung

Ursache	Wirkung
hohe Temperatur	<ul style="list-style-type: none"> Lithium-/Kapazitätsverlust Zersetzung des Binders Deckschichtwachstum (SEI-Schicht) Lösungsmittel- und Leitsalzreduktion Korrosion des Kupfers: Impedanzanstieg oder Kurzschluss Zersetzung des Alu-Ableiters: Impedanzanstieg, Kurzschluss
hohe Zellspannung	<ul style="list-style-type: none"> Lithium-/Kapazitätsverlust Verlust von Aktivmaterial, Zersetzung des Binders Zersetzung des Alu-Ableiters: Impedanzanstieg, Kurzschluss
tiefer Ladezustand	<ul style="list-style-type: none"> Korrosion des Kupfers: Impedanzanstieg oder Kurzschluss
hohe Entladetiefe	<ul style="list-style-type: none"> Volumenänderung, Lithiumverlust, Impedanzanstieg
Zyklenzahl	<ul style="list-style-type: none"> Impedanzanstieg
hohe Stromdichte	<ul style="list-style-type: none"> Impedanzanstieg

Es wurde bereits erwähnt, dass ein hohes Maß an Kenntnissen über die Zusammenhänge der Alterung nötig ist, um ein Ereignisbasiertes Modell für Degradationsuntersuchungen zu verwenden. Genau genommen müssten für jedes Feld der erwähnten Matrix Langzeituntersuchungen durchgeführt werden, um den dazugehörigen „Lebensdauerverbrauch“ exakt bestimmen zu können. Da dies zusätzlich bei verschiedenen Temperaturen nötig wäre, hätte dies eine hohe Anzahl an Testmodulen und eine sehr viel längere Testphase zur Folge. Durch vorangegangene Untersuchungen und Forschungsprojekte sind jedoch schon erste Ergebnisse vorhanden und weiterhin werden durch die zur Verfügung stehenden Module Stützstellen zur Extrapolation erfasst. Im Falle des Moduls vom Typ 1 können zusätzlich Herstellerangaben herangezogen werden (siehe **Abbildung 109**).

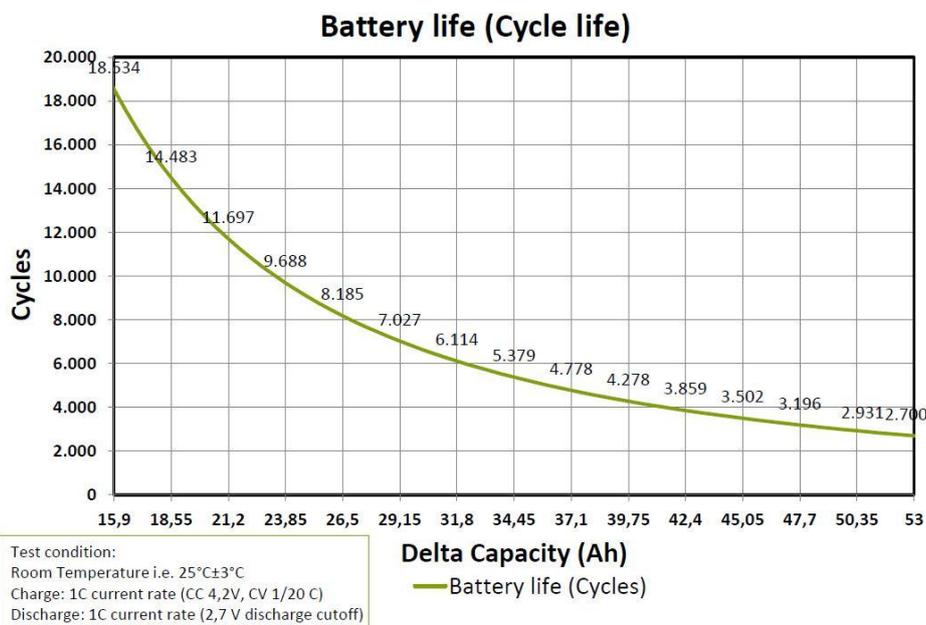


Abbildung 109: Zykluslebensdauer über Amperestundendurchsatz Batteriesystem Typ 1

Zusätzlich werden auch Tests mit anderer Zellchemie durchgeführt, da Unterschiede bzw. einheitliche Zusammenhänge im Bereich der verschiedenen Lithium-Technologien erfasst werden sollen. Denn gerade für die Typ 2-Technologie stehen keine Erfahrungswerte zur Verfügung, da diese nicht in hohem Maße verwendet wird und keine wissenschaftlich fundierten Untersuchungen bekannt sind. Es zeigt sich also, dass zunächst einmal

grundlegende Tests der Batteriemodule nötig sind, um die erforderlichen Zusammenhänge der Degradation aufzuzeigen.

Da im Feldversuch die realen Daten der Batteriesysteme insgesamt (Strom, Spannung, Temperatur, Ladezustand) aufgezeichnet werden, können diese direkt ausgewertet und in das Modell eingespeist werden. Für eine Prognose der Lebensdauer bei generierten bzw. vorgegebenen Lastgängen ist jedoch zusätzlich ein elektrochemisches/physikalisches Modell nötig, welches die Momentanwerte simuliert. Dies ist erforderlich, damit bei einer Stromvorgabe beispielsweise der Ladezustand berechnet werden kann, welcher gemäß Abbildung 108 erheblichen Einfluss auf die Alterung hat.

4.4.3.1 Entwicklung eines elektrochemischen / physikalischen Modells

Bei dieser Modellkategorie wird das elektrische Verhalten einer Batterie durch einfache Ersatzschaltbildelemente, wie Spannungsquellen, Widerstände, Kapazitäten und Induktivitäten nachgebildet. Vorteil dieser Modellierungsart ist ihre hohe Flexibilität. Diese ermöglicht eine einfache Anpassung der Modellkomplexität an die Anforderungen der jeweiligen Anwendung. Detaillierte Modelle erzielen eine präzise Nachbildung der einzelnen elektrochemischen Effekte, während stark vereinfachte Modelle mit nur wenigen Widerständen und Kapazitäten zu einer äußerst schnellen Berechnung führen. Dies kann in komplexen Systemen, wie einer Gesamtfahrzeugsimulation oft wichtiger sein als die hochaufgelöste Nachbildung der Batteriedynamik. Bei elektrochemischen / physikalischen Batteriemodellen wird in der Regel eine Spannungsquelle mit Widerständen, Induktivitäten und Kapazitäten kombiniert. Die Ladezustandsänderung wird über eine Ladungsbilanzierung durch Integration der fließenden Ströme durchgeführt. **Abbildung 110** zeigt eine Auswahl verschieden komplexer Modelle, die sich deutlich hinsichtlich ihrer Genauigkeit und ihres Berechnungsaufwandes unterscheiden.

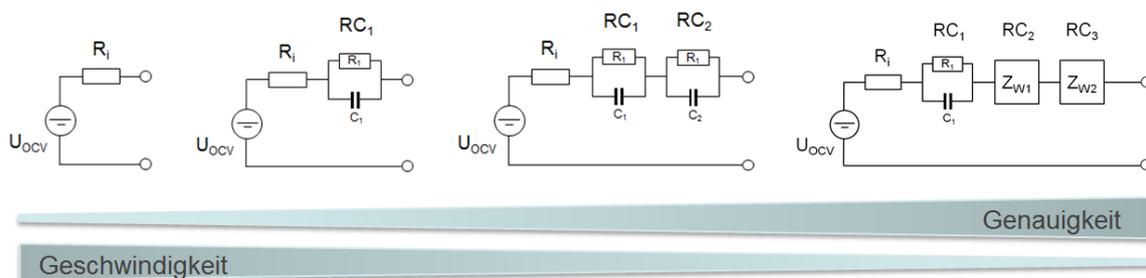


Abbildung 110: verschiedene Modellvarianten [KeJos]

Es soll ein Batteriemodell erstellt werden, welches folgende Eigenschaften aufweist:

- Es soll die Klemmspannung in Abhängigkeit vom Strom abbilden
- Es soll die Wärmebilanz der Batterie und die daraus resultierende Batterietemperatur berechnen
- Es soll den Leistungsverlust durch Alterung in Form von veränderlichen Widerständen abbilden
- Es soll den Kapazitätsverlust über die Nutzungsdauer in Abhängigkeit von einem Belastungsszenario simulieren

Zur Parametrierung und Verifikation des elektrochemischen Modells werden zahlreiche Messungen an den Modulen der verschiedenen Zellchemien durchgeführt, da zunächst ein möglichst genaues Batteriemodell erstellt werden sollte. Ggf. ist das Modell bei der Simulation mit Hilfe der Felddaten zu vereinfachen, um ein ausgewogenes Verhältnis von Geschwindigkeit und Genauigkeit zu erlangen. Dies wird sich jedoch erst bei den ersten

Simulationen der Stromprofile aus der Feldumgebung erweisen, für welche noch keine ausreichende Datengrundlage besteht.

Das statische Verhalten einer elektrochemischen Zelle wird durch ihre Ruhespannung (unbelasteter Zustand) bestimmt, welche hauptsächlich von ihrem Ladezustand abhängt. Je voller die Batterie ist, desto höher liegt auch ihre Ruhespannung. Diese ist nach einer entsprechend langen Wartezeit an den Klemmen messbar, wenn alle dynamischen Reaktionen abgeklungen sind. Hierfür sind Wartezeiten von bis zu mehreren Stunden notwendig. Jedoch kann die Ruhespannung auch durch Mittelung der Spannungsverläufe einer Konstantstrom-Ladung und Konstantstrom-Entladung mit kleiner Amplitude ermittelt werden. Dieses Verfahren verkürzt die Testzeit erheblich und lediglich im Bereich niedriger Ladezustände ($< 10\%$) sind gewisse Ungenauigkeiten vorhanden. Voraussetzung hierfür ist jedoch ein sehr geringer Lade-/Entladestrom. Das Modul vom Typ 1 verfügt über eine Kapazität von 159 Ah. In diesem Fall wurde ein Strom in Höhe von $1/20\text{ C}$ bzw. 8 A verwendet, wobei ein Lade-/Entladezyklus rund zwei Tage andauerte. Da die Ruhespannung ebenfalls von der Temperatur abhängig ist, wurde dieser Test für verschiedene Temperaturen wiederholt. **Abbildung 111** stellt beispielhaft den Verlauf der Ruhespannung bei 25 °C dar.

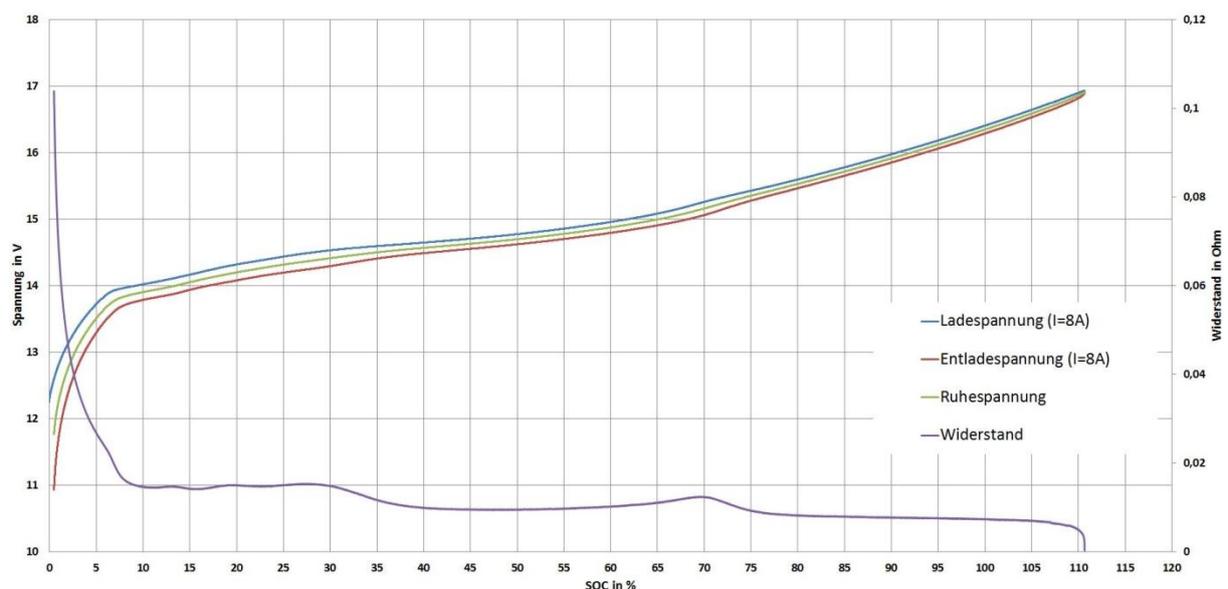


Abbildung 111: Ruhespannungsverlauf (U_0) Modul Typ 1 bei 25 °C

Es ist zu erkennen, dass anhand des geringen Lade-/Entladestroms über den gesamten Ladezustandsbereich gearbeitet werden konnte, wodurch jeder spezifische Ladezustand einer Ruhespannung zugeordnet werden kann. Für die spätere Simulation der Klemmenspannung werden die verschiedenen Ruhespannungsverläufe in Nachschlagetabellen im Modell hinterlegt. Zusätzlich ist in **Abbildung 111** eine Kurve für den Widerstand des Moduls erkennbar. Konstantstromkurven bieten eine erste einfache Möglichkeit zur Ermittlung des Innenwiderstandes, durch Teilung der Spannungsdifferenz zwischen der Lade- und Entladekurve durch das Doppelte des Strombetrags. Hieraus ergibt sich der Gesamtwiderstand in Abhängigkeit des Ladezustands. Der Gesamtwiderstand stellt die Summe aller Einzelwiderstände von SEI-Schicht, Ladungsdurchtritt und Diffusion im eingeschwungenen Zustand dar. Für ein genaues Batteriemodell ist jedoch die Kenntnis über die einzelnen elektrochemischen Effekte, also das dynamische Verhalten, nötig.

Das dynamische Verhalten der zu testenden Lithium-Technologien wurde mittels einer elektrochemischer Impedanzspektroskopien (EIS) ermittelt. Hierbei wird das Testobjekt mit einem sinusförmigen Anregungssignal belas-

tet und die Sprungantwort aufgezeichnet, wodurch die einzelnen elektrochemischen Effekte einer Batterie bestimmt werden können. Abbildung 112 zeigt beispielhaft das Impedanzspektrum der Eingangsmessung des Moduls vom Typ 2.

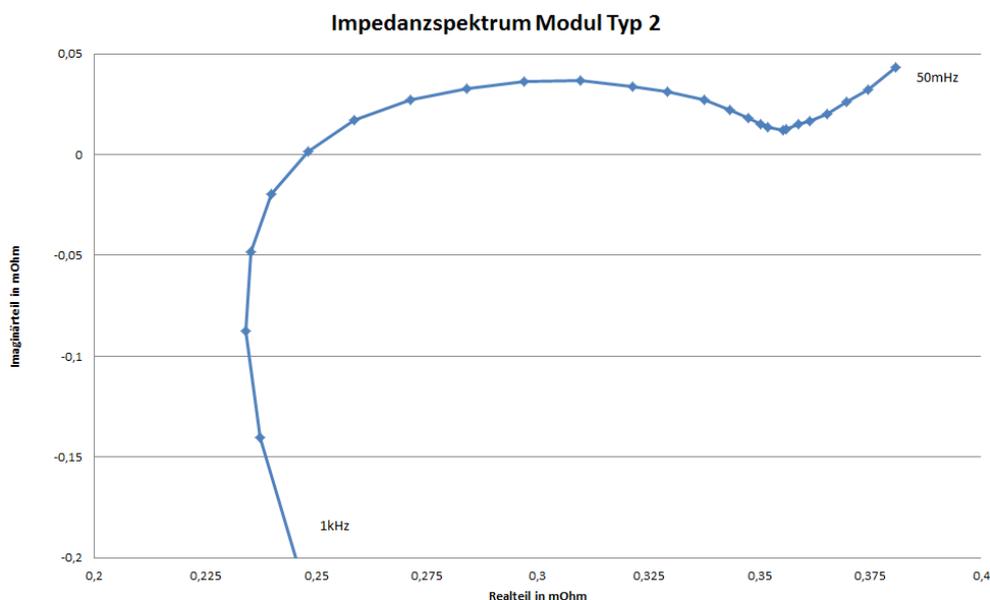


Abbildung 112: Impedanzspektrum Modul Typ 2

Durch die beschriebenen Untersuchungen der Module konnte ein Modell entwickelt werden, welches Ruhespannung und Stromrate, Amperestundendurchsatz, Klemmenspannung, Batterietemperatur und Alterung miteinander verknüpft und auf Grundlage eines eingespeisten Stromprofils berechnet. Die Struktur dieses Modells ist in Abbildung 113 dargestellt.

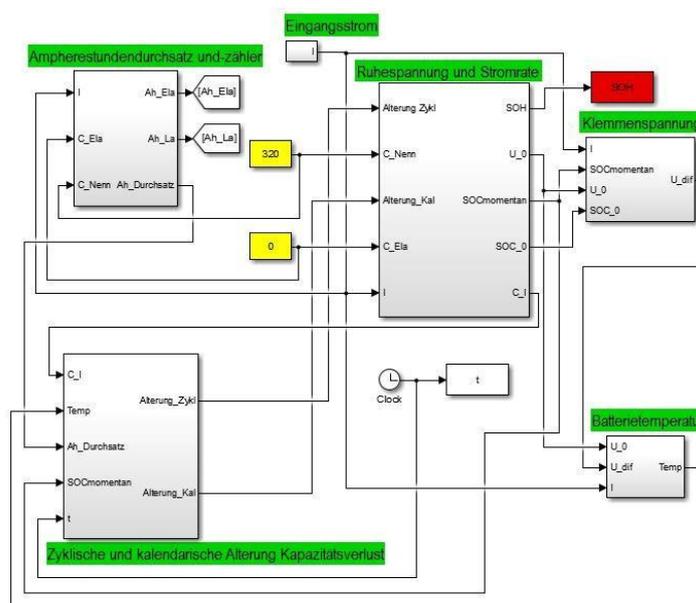


Abbildung 113: Übersicht Modellstruktur

Auf Grundlage des eingespeisten Stromprofils wird das dynamische Verhalten der Batterie abgebildet und daraus die für die Degradation entscheidenden Faktoren – Temperatur, Ah Durchsatz (Lade-/Entladehub), Ladezustand und Laderate – bestimmt. Hinsichtlich der Degradation wird im Modell zwischen kalendarischer und zykli-

scher Alterung unterschieden, wobei die kumulierte Alterung wiederum Rückwirkungen auf das dynamische Verhalten erzeugt. Die Simulation kann dabei zu jedem beliebigen Zeitpunkt gestoppt und die entsprechenden Momentanwerte entnommen werden. Die Parameter für die Berechnung des Alterungsverhaltens wurden dabei anhand der vorangegangenen Moduluntersuchungen und Literaturquellen generiert. Ziel ist es dieses Modell ebenfalls auf die Batteriesystemebene zu skalieren, wofür zum jetzigen Zeitpunkt jedoch die Felddaten noch nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen.

4.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

4.5.1 Kostenvorteilen durch Lastverschiebungspotenziale

4.5.1.1 Berechnung der Betriebskosten

Die Betriebskosten werden als laufenden Kosten während der Nutzungsdauer der Vermögensgegenstände definiert und umfassen Wartungs- und Reparaturkosten für Batteriesysteme, BWS und Fahrzeuge sowie Energiekosten (Strom oder Dieselkraftstoff). Die Energiekosten wiederum sind abhängig von der Fahrleistung, dem Verbrauch sowie den Strom- bzw. Dieselkraftstoffpreisen.

Da die Wirtschaftlichkeit von Transportflotten stark von der Entwicklung der Energiepreise abhängig ist, werden drei verschiedene Energiepreisszenarien während des Betrachtungszeitraums untersucht. Auf der einen Seite werden die Ölpreisszenarien aus Studienarbeiten der International Energy Agency (IEA) übernommen. Die prognostizierten jährlichen Preissteigerungsraten pro Jahr werden auf den Dieselbezugspreis eines Containerterminalbetriebs aus dem Jahr 2012 (1,16 €/ Liter¹²) aufgeschlagen. Für die Prognose des zukünftigen Strompreises werden auf der anderen Seite die erwarteten Preissteigerungsraten aus Studienarbeiten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und des Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IWES) verwendet. Die jeweiligen Preissteigerungsraten werden auf den Strombezugspreis eines Containerterminalbetriebs aus dem Jahr 2012 (14,5 Cent / kWh¹³) aufgeschlagen. Die gemäß der Studienergebnisse prognostizierte Entwicklung der jeweiligen Energiepreise ist in nachfolgender eigener **Abbildung 114** illustriert.

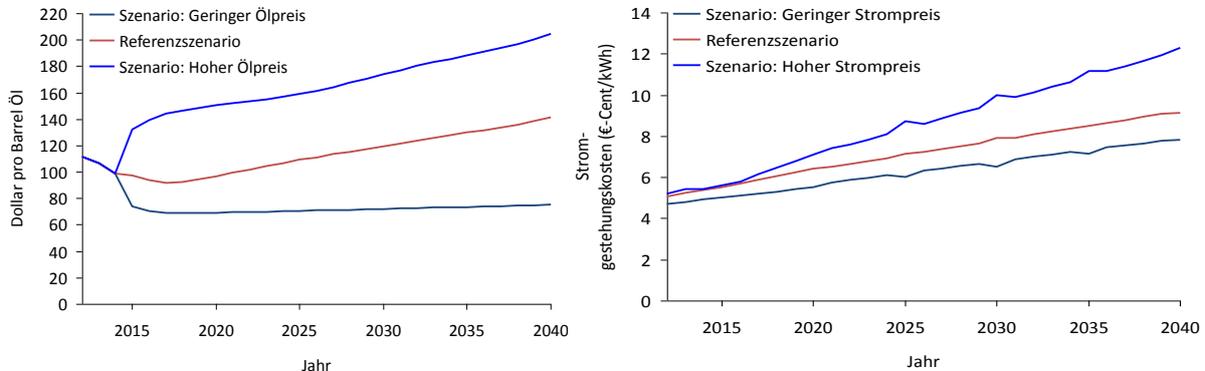


Abbildung 114: Prognostizierte Entwicklung der Energiepreise (Öl und Strom) bis 2040.

¹² durchschnittlichen Dieselkraftstoffpreis für Großkunden (siehe Statistisches Bundesamt, 2014).

¹³ durchschnittlicher Strompreis für Großkunden (siehe Nitsch et al., 2012).

Beispiel: Berechnung der Energiekosten der B-AGV-Flotte

Der Verbrauch eines B-AGV beträgt 21,5 kWh je Betriebsstunde unter Berücksichtigung von Verlustleistung beim Laden

Im Durchschnitt operieren die Fahrzeuge etwa 6000 h im Jahr

Der Jahresverbrauch der Flotte (10 Fahrzeuge) beträgt daher 1.290.000 kWh

Der Strompreis betrug für einen Containerterminalbetrieb 0,145 € / kWh in 2012

Das ergibt reine Strombezugskosten in Höhe von 187.050 € für das Betriebsjahr 2012

Die sich aus den Szenariodaten ergebende Entwicklung der Strombezugskosten für die Ladung der Batteriesysteme im Betrachtungszeitraum (bis 2027) ist in **Abbildung 115** dargestellt.

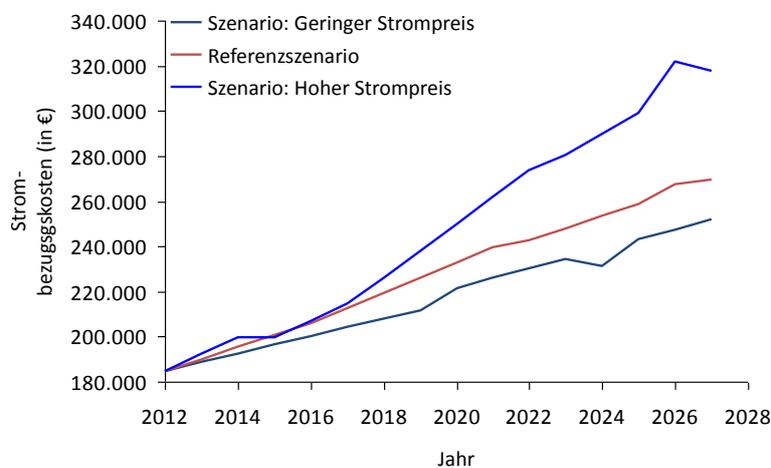


Abbildung 115: Entwicklung der jährlichen Strombezugskosten für die Ladung der Batterien je Szenario.

Eine Besonderheit für den Einsatz der Containertransporter im gewerblichen/industriellen Maßstab ist, dass sich die Strombezugskosten durch gesteuerte Ladevorgänge reduzieren lassen, welches einen positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer B-AGV-Flotte hat. Dabei kann das Laden auf die Stunden mit den geringsten vorherrschenden Strompreisen (am Spotmarkt für elektrische Energie) verschoben werden. Dies wird in **Abbildung 116** für einen Referenztag (10 Nov. 2013) und ein Batteriesystemveranschaulicht; die entladene Wechselbatterie tritt zur Stunde 1 in die BWS ein und wird zur Stunde 17 wieder im Fahrbetrieb benötigt. Sie kann mit einem unterbrechbaren Ladevorgang von insgesamt sechs Stunden Dauer vollständig in der BWS geladen werden (für Blei-Batteriesysteme ist eine Ladeleistung von 48 kW, das heißt eine Laderate von 1/6 C angemessen). Folglich wird die Wechselbatterie in den 6 Stunden aus dem gesamten Aufenthaltszeitraum von 16 Stunden in der BWS geladen, in denen die Spotmarktpreise am niedrigsten sind.

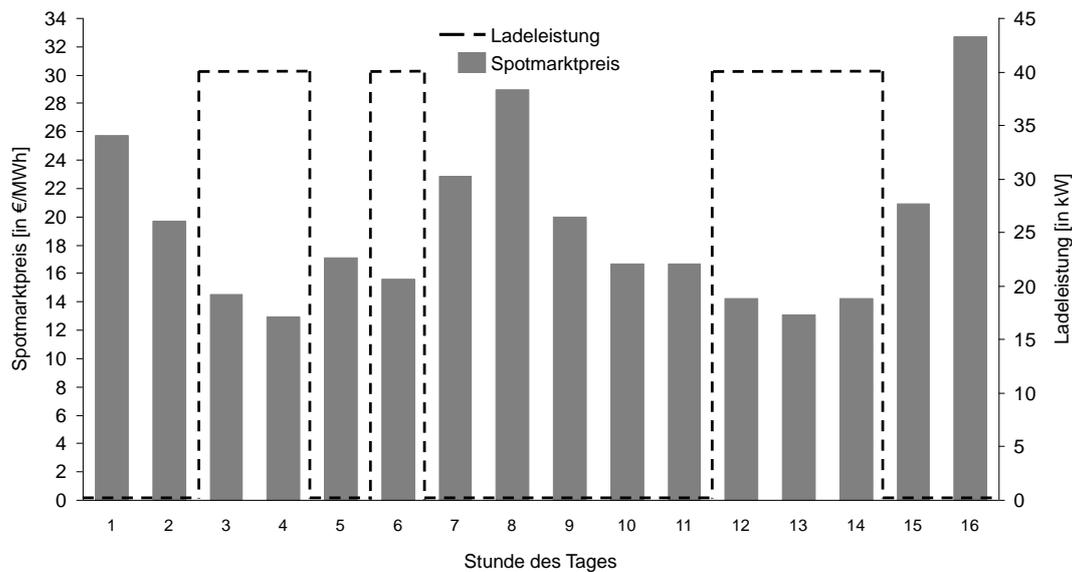


Abbildung 116: Illustration der optimierenden Planung von Strombezugskosten für die Ladung einer Wechselbatterie.

Bisherige Planungsergebnisse haben ergeben, dass sich die Strombezugskosten um bis zu 30 % durch gesteuerte Ladevorgänge gegenüber ungesteuertem Laden zu Fixpreiskonditionen reduzieren lassen¹⁴.

Zuletzt umfassen die Wartungskosten geplante Instandhaltungsmaßnahmen (monatlich bzw. jährlich) sowie ungeplante Reparaturen. Beispielsweise müssen die Batteriesysteme einmal im Monat im Rahmen einer kleineren Inspektion gewartet werden (zum Beispiel zum Nachfüllen von Elektrolytflüssigkeit) sowie einmal im Jahr einer großen Inspektion unterzogen werden.

4.5.1.2 Ergebnisse der Kostenvergleichsrechnung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der TCO-Analyse für verschiedene Ausstattungs- und Betriebsszenarios vorgestellt.

1. Ungesteuertes Laden mit einem fixen Strompreis /

Ausstattungsverhältnis 2 Wechselbatterien für 1 Transportfahrzeug

Das erste Szenario stellt eine Basisausstattung für einen Containerterminalbetrieb dar, in dem die Wechselbatterien in der Station unwillkürlich zu Fixpreiskonditionen (z. B. aus einem Vollversorgungsvertrag) geladen werden.

2. Gesteuertes Laden mit einem variablen Strompreis /

Ausstattungsverhältnis 2 Wechselbatterien für 1 Transportfahrzeug

Auch im zweiten Szenario gibt es ein großzügiges Ausstattungsverhältnis, so dass einem Fahrzeug ein ganzes Paar von Batteriesystemen zur Verfügung stehen. Das bedeutet, die eine Wechselbatterie kann die ganze Zeit über stationär geladen werden, während die andere Wechselbatterie (Zwilling) im Fahrbetrieb an Bord des Fahrzeugs ist. Die Wechselbatterien werden in diesem Szenario derart geladen, dass von variablen Strompreiskonditionen profitiert werden kann.

3. Ungesteuertes Laden mit einem fixen Strompreis /

Ausstattungsverhältnis 16 Wechselbatterien für 10 Fahrzeuge

¹⁴ Die Analyse wurde für das Jahr 2013 anhand simulierter BAGV Einsatzzeiten durchgeführt. Darüber hinaus wurden fixe Preiskomponenten (z. B. EEG Umlage oder Netzentgelte) auf den Spotmarktpreis hinzugerechnet.

Im dritten Szenario wurden nur so viele Wechselbatterien im Pool zur Verfügung gestellt, wie minimal erforderlich sind, um den Fahrbetrieb zusichern zu können.

Um die Ergebnisse übersichtlicher darstellen zu können, wird für alle Ausstattungs- und Betriebsszenarios lediglich das als beste Referenz anerkannte Preisszenario zur Prognose der Öl- und Strompreisentwicklung gezeigt. Wie bereits in **Abbildung 114** ersichtlich, werden in dem Referenzszenario der Ölpreisentwicklung zunächst sinkende Preise erwartet, welche erst ab dem Jahr 2021 wieder steigen. Im Gegensatz hierzu gehen die meisten Studien von weiter konstant steigenden Strompreisen in den nächsten Jahren in Deutschland aus. Sämtliche jährliche Gesamtkostenwerte über den Betrachtungszeitraum 2012 bis 2027 hinweg auf den für das Jahr 2012 bei einer E-AGV-Flotte festgestellten Gesamtkostenwert normiert.

4.5.1.2.1 Ungesteuertes Laden / 2:1 Ausstattung

Grundsätzlich muss bei diesem Szenario angemerkt werden, dass es sich hierbei lediglich um ein Vergleichsszenario handelt. So kann die Batterieausstattung zu einem gewissen Grad reduziert werden, ohne dass Leistungseinbußen in der Logistikperformance entstehen würden. Dies liegt daran, dass die durchschnittliche Nutzungszeit eines B-AGV mit einer Batterieladung (ca. 16 bis 20 Betriebsstunden) deutlich höher ist, als die jeweilige Dauer eines vollständigen Ladeprozesses in der BWS (ca. 6 Stunden).

Die Ergebnisse der TCO-Analyse werden in **Abbildung 117** dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung werden der Verlauf der jährlichen Kosten sowie die kumulierten Gesamtkosten beider Transportflotten während der Untersuchungsperiode dargestellt. Auf der rechten Seite werden die jährlichen Kosten am Anfang und am Ende der Untersuchungsperiode unterteilt in deren Kapital-, Energie- und Wartungskosten aufgezeigt.

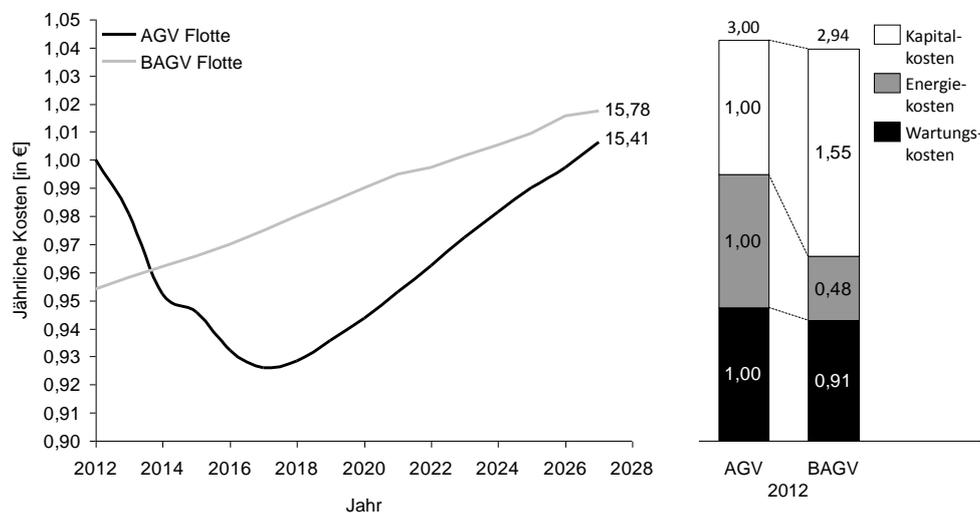


Abbildung 117: Verlauf der jährlichen Kosten von 2012-2027 sowie Darstellung der Kostenkomponenten beider Flotten für das Jahr 2012 und 2027.

Insgesamt kann gezeigt werden, dass die E-AGV-Flotte über den gesamten Zeitraum betrachtet in diesem Szenario einen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber der B-AGV-Flotte hat. So liegen die normierten kumulierten Gesamtkosten der B-AGV-Flotte (15,78) knapp über den Gesamtkosten der E-AGV-Flotte (15,41). Darüber hinaus ist erkennbar, dass die jährlichen Kosten der B-AGV-Flotte am Anfang der Nutzungsperiode geringer sind als die jährlichen Kosten der E-AGV-Flotte. Jedoch verliert die B-AGV-Flotte diesen wirtschaftlichen Vorteil nach etwa zwei Jahren. Dies liegt daran, dass von weiter steigenden Strompreisen ausgegangen wird, während die Ölpreise laut den Erwartungen bis zum Jahr 2018 zurückgehen.

Durch die Aufteilung der Gesamtkosten der Flotten in verschiedene Kostenkomponenten kann gezeigt werden, dass die Energiekosten der B-AGV-Flotte insgesamt dennoch signifikant geringer sind. Den größten ökonomischen Nachteil der B-AGV-Flotte stellen die hohen Kapitalkosten dar, welche auf die verhältnismäßig teure BWS sowie der Beschaffung von Ersatzbatterien zurückgeführt werden können. Zuletzt wird ersichtlich, dass die Wartungskosten der B-AGV-Flotte geringer sind als die Wartungskosten der E-AGV-Flotte.

4.5.1.2.2 Gesteuertes Laden / 2:1 Ausstattung

Bei der 2:1 Ausstattung ist die Verweildauer der Batterien in der BWS deutlich länger als die notwendige Ladedauer. Dabei konnte bereits gezeigt werden, dass durch Ausnutzung der so entstehenden Flexibilität die Energiekosten gegenüber dem ungesteuerten Laden zu einem fixen Strombezugspreis beträchtlich reduziert werden. Der Einfluss der geringeren Strombezugskosten auf die TCO wird in **Abbildung 118** dargestellt.

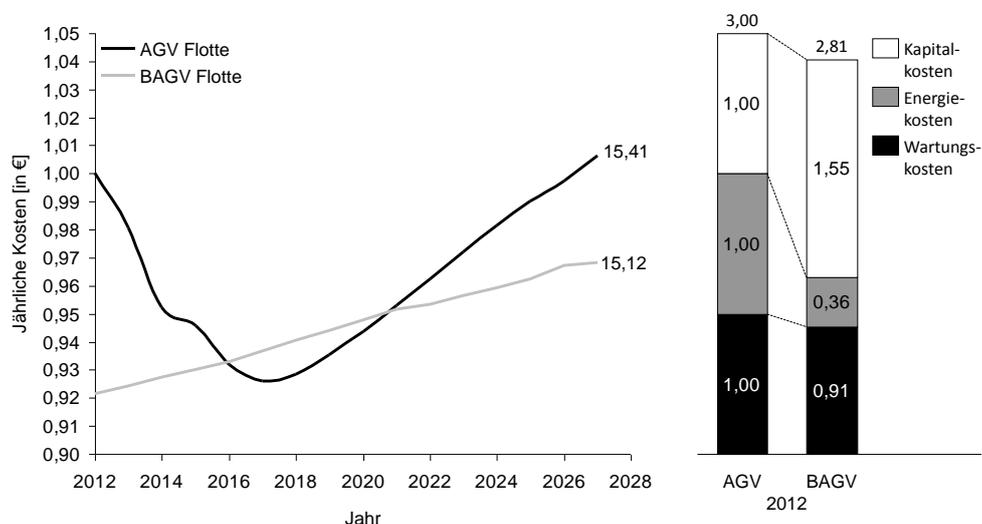


Abbildung 118: Verlauf der jährlichen Kosten von 2012-2027 sowie Darstellung der Kostenkomponenten beider Flotten für das Jahr 2012 und 2027.

Die kumulierten Gesamtkosten der B-AGV-Flotte sind insgesamt geringer als die der E-AGV-Flotte. Folglich kann durch eine Optimierung der Strombezugskosten erreicht werden, dass die B-AGV-Flotte einen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber der E-AGV-Flotte aufweist. Dieses Ergebnis ist besonders vor dem Hintergrund relevant, dass die Kapitalkosten der B-AGV-Flotte signifikant höher sind als die der E-AGV-Flotte. Jedoch können die geringeren laufenden Kosten diesen ökonomischen Nachteil in diesem Szenario ausgleichen bzw. sogar überkompensieren.

4.5.1.2.3 Ungesteuertes Laden / Minimalausstattung

Um zehn Fahrzeuge betreiben zu können, muss es selbstverständlich zumindest zehn Wechselbatterien geben, mit denen die Fahrzeuge zu Betriebsbeginn ausgestattet sind. Es gebraucht allerdings nicht unbedingt zehn weitere Wechselbatterien um den Fahrbetrieb aufrecht zu erhalten. In Simulationsexperimenten konnte nachgewiesen werden, dass sämtliche Transportaufträge auch mit sechs anstatt zehn zusätzlichen Wechselbatterien im Pool absolviert werden können. Hierdurch wird jedoch auch die Flexibilität beim stationären Laden signifikant reduziert, da die Aufenthaltsdauer einer Batterie in der BWS kürzer ist als in den oben dargestellten Szenarios. Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, dass die Ladeflexibilität in diesem Szenario zu gering ist, um gesteuerte Ladevorgänge zu implementieren. Die Ergebnisse der TCO-Analyse für dieses Szenario werden in **Abbildung 119** illustriert.

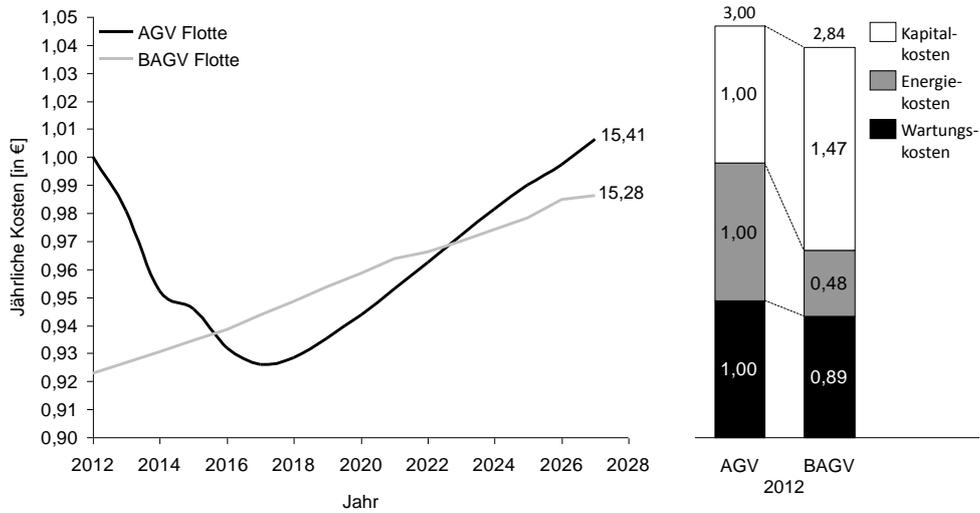


Abbildung 119: Verlauf der jährlichen Kosten von 2012-2027 sowie Darstellung der Kostenkomponenten beider Flotten für das Jahr 2012 und 2027.

Auch in diesem Szenario weist die B-AGV-Flotte einen ökonomischen Vorteil gegenüber der E-AGV-Flotte auf. Im Gegensatz zum ersten Szenario „ungesteuertes Laden / 2:1 Ausstattung“ konnten die Kapital- und Wartungskosten durch die geringere Anzahl zusätzlicher Batterien signifikant reduziert werden. Jedoch sind die Energiebezugskosten gegenüber dem zweiten Szenario „gesteuertes Laden / 2:1 Ausstattung“ höher.

4.5.1.3 Zusammenfassung Kostenvorteile

In **Abbildung 120** wird zusammenfassend der Verlauf der jährlichen Kosten und kumulierten Gesamtkosten innerhalb der Untersuchungsperiode für die E-AGV-Flotte sowie für B-AGV-Flotte illustriert. Dabei werden die Berechnungsergebnisse sämtlicher drei untersuchter Ausstattungs- und Betriebsszenarios dargestellt.

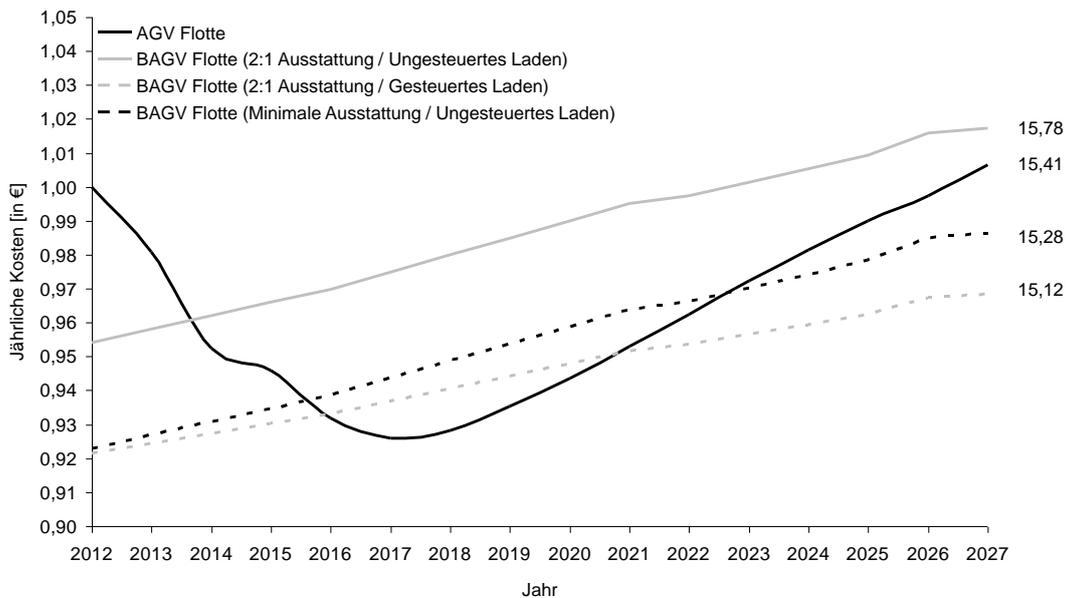


Abbildung 120: Verlauf der jährlichen Kosten von 2012-2027 für die E-AGV-Flotte und B-AGV-Flotte in allen für alle Szenarios.

Die B-AGV-Flotte weist lediglich in dem Szenario „ungesteuertes Laden / 2:1 Ausstattung“ einen wirtschaftlichen Nachteil gegenüber der E-AGV-Flotte auf. Ursächlich hierfür sind besonders die signifikant höheren Kapitalkosten, welche auf die kostenintensive BWS sowie der hohen Anzahl zusätzlicher Batteriesystem zurückzuführen

sind. Am profitabelsten lässt sich die B-AGV-Flotte betreiben, indem das zeitliche Lastverschiebepotential bei einer 2:1 Ausstattung ausgenutzt wird, um den Energiebezug zu optimieren. Eine weitere ökonomisch sinnvolle Strategie ist es, das Ausstattungsverhältnis der Wechselbatterien zu den Fahrzeugen zu reduzieren, wobei hieraus keine Einschränkungen in der Logistikperformance entstehen dürfen. Durch diese Strategie lassen sich zum einen die Kapitalkosten reduzieren, da weniger Wechselbatterien für den Pool beschafft werden müssen. Darüber hinaus sind die Wartungskosten in diesem Szenario am geringsten, da weniger Batteriesysteme gewartet werden müssen.

Einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der B-AGV-Flotte hat die BWS, da diese im Vergleich zu einer Dieseltankstelle mit deutlich höheren Anschaffungskosten verbunden ist. Hierbei kann jedoch davon ausgegangen werden, dass eine BWS, welche für eine größere Anzahl von Fahrzeugen ausgelegt ist, günstiger sein wird als der derzeit bekannte Prototyp.

Zusammenfassend lässt sich jedoch sagen, dass die B-AGV-Flotte insgesamt wirtschaftlicher betrieben werden kann als eine vergleichbare E-AGV-Flotte. Dies liegt besonders an den signifikant geringeren Energiekosten der B-AGV-Flotte. Darüber hinaus wird langfristig mit steigenden Ölpreisen gerechnet, wohingegen angenommen wird, dass sich der Strompreis in den nächsten Jahren auf einem konstanten Niveau einpendeln wird. Der Einfluss einer Änderung der Energiepreise wird abschließend in nachfolgender Tabelle dargestellt. Hier werden die Gesamtkosten beider Flotten für sämtliche Ausstattungs- und Betriebsszenarios sowie der Szenarios für die Energiepreisentwicklung dargestellt (normiert in AGV Werten für das Jahr 2012 im Referenzszenario). Dabei wird ersichtlich, dass unterschiedliche Energiepreisszenarien einen signifikanten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit beider Flotten haben.

Tabelle 15: Gesamtkosten beider Flotten in allen Ausstattungs- und Betriebsszenarios sowie unterschiedlicher Energiepreisszenarien.

Flotte	Energiepreisszenario	Ausstattungs- und Betriebsszenario	Normierte Gesamtkosten
AGV	Geringer Ölpreis		14,38
	Referenzszenario		15,41
	Hoher Ölpreis		17,42
BAGV	Sehr geringer Strompreisanstieg	2:1 Ausstattung / ungesteuertes Laden	15,70
	Moderater Strompreisanstieg	2:1 Ausstattung / ungesteuertes Laden	15,78
	Starker Strompreisanstieg	2:1 Ausstattung / ungesteuertes Laden	16,06
BAGV	Sehr geringer Strompreisanstieg	2:1 Ausstattung / gesteuertes Laden	15,03
	Moderater Strompreisanstieg	2:1 Ausstattung / gesteuertes Laden	15,12
	Starker Strompreisanstieg	2:1 Ausstattung / gesteuertes Laden ging	15,29
BAGV	Sehr geringer Strompreisanstieg	1,6:1 Ausstattung / ungesteuertes Laden	15,15
	Moderater Strompreisanstieg	1,6:1 Ausstattung / ungesteuertes Laden	15,28
	Starker Strompreisanstieg	1,6:1 Ausstattung / ungesteuertes Laden	15,51

4.5.2 Berechnungen von Investitionskosten

Bei einer stärkeren Durchdringung von Elektromobilität im Containerterminal ergeben sich vermutlich Skaleneffekte. Es konnte bereits gezeigt werden, dass die Einrichtung einer Batteriewechselstation (BWS) einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der B-AGV-Flotte hat, da diese im Vergleich zu einer Dieseltankstelle mit deutlich höheren Anschaffungs-/Aufbaukosten verbunden ist. Über die gegenwärtig im CTA errichtete BWS ließe sich nach derzeitigem Kenntnisstand die Energie für maximal ca. 24 Fahrzeuge bereitstellen. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine größer angelegte Station für ca. 42 Fahrzeuge verhältnismäßig günstiger sein wird als

dieser Stationsprototyp. Dies liegt darin begründet, dass gewisse Fixkosten (z. B. für die Stromzuleitung von Mittelspannungsebene) auf eine größere Anzahl von Ladestellen und den zu versorgenden B-AGV heruntergebrochen werden. Weitere positive Skaleneffekte ergeben sich, da bei größeren B-AGV-Flotten die deutlich geringeren Betriebskosten (Energiekosten) der elektrisch betriebenen Transportfahrzeuge stärker ins Gewicht fallen. Ferner könnte bei schwankender Transportlast beim Containerterminal für größere Anteile von B-AGV in der Flotte eine der Pool von Wechselbatterien verhältnismäßig geringer bestückt werden. Zuletzt werden sich bei größeren Flottenanteilen weitere Kostendegressionseffekte in puncto Wartung und Instandhaltung bemerkbar machen.

Die TCO-Analyse wurde für unterschiedliche Flottenanteile von B-AGV für einen Betrachtungszeitraum von 15 Jahren in jeweiliger Gegenüberstellung zu einer gleichgroßen E-AGV-Flotte durchgeführt. Die Tabelle 16 enthält eine Übersicht der angedachten B-AGV-Flottenanteile und jeweilige Investitionsalternativen aus E-AGV. Im Rahmen der TCO-Analyse werden sämtliche Vermögensgegenstände aus den Flottenanteilen von B-AGV und E-AGV (Dieseltankstelle, Batteriewechselstation, Fahrzeuge und Batterien) erfasst. Die anschließende Beurteilung einer Investitionsalternative erfolgt auf Basis des Kapitalwertes. Dieser stellt die Summe aller auf einen Zeitpunkt abgezinsten Auszahlungen dar, die durch die Realisation eines Investitionsobjektes im Rahmen der Nutzungsperiode verursacht werden. Der Kapitalwert wird dabei auf den Beginn des Planungszeitraums bezogen, d.h. zu dem Zeitpunkt, in dem die B-AGV-Flotte bzw. die E-AGV-Flotte beschafft wurde.

Die jährlichen Kosten der B-AGV-Flotte wie auch der gegenübergestellten E-AGV-Flotte setzen sich aus Kapitalkosten K^{capex} für den Kauf und Inbetriebnahme eines Vermögensgegenstandes (z. B. Kauf von B-AGV) sowie Betriebskosten K^{opex} zusammen. Für die Berechnung der Kapitalkosten in einem spezifischen Jahr wird der Listenpreis mit der Anzahl an benötigten Vermögensgegenständen in diesem Jahr multipliziert. Betriebskosten stellen die laufenden Kosten während der Nutzungsdauer (z. B. Energiekosten) dar. Gemäß dem dynamischen Berechnungsmodell wurden die in der Zukunft liegenden Kosten mit einem Abzinsungsfaktor $(1+i)^{-t}$ diskontiert. Dabei repräsentiert der Faktor t als Zeitindex einen einjährigen Abschnitt des Betrachtungszeitraums. Die auf einen Zeitpunkt bezogenen Gesamtkosten einer Flotte K_{Flotte} können durch die Addition der jährlichen Kosten während der Nutzungsperiode ermittelt werden.

$$K_{Flotte} = \sum_{t=0}^T (K_t^{capex} (1+i)^{-t} + K_t^{opex} (1+i)^{-t}).$$

Tabelle 16: Überblick zu den analysierten Flottenanteilen der B-AGV und den gegenübergestellten E-AGV als jeweilige Investitionsalternative

	Szenarios mit Einführung von B-AGV	Vergleichsszenarios mit E-AGV
Vollausstattung mit B-AGV	Die aktuelle Flotte (86 Fahrzeuge) wird komplett auf batterie-betriebene Fahrzeuge umgestellt	Eine Flotte mit 86 E-AGV
Vollausstattung mit B-AGV plus Terminalerweiterung	Die gesamte Flotte wird auf batterie-betriebene Fahrzeuge umgestellt, nachdem das Horizontaltransportareal ausgeweitet wurde	Eine Flotte mit 105 E-AGV
Mittlere Durchmischung mit B-AGV	Die aktuelle Flotte (86 Fahrzeuge) wird zur Hälfte auf batterie-betriebene Fahrzeuge umgestellt	Eine Flotte mit 40 E-AGV
Geringe Durchmischung mit B-AGV	Die aktuelle Flotte (86 Fahrzeuge) wird zu einem Viertel auf batterie-betriebene Fahrzeuge umgestellt	Eine Flotte mit 20 E-AGV

Neben der Anzahl der Fahrzeuge muss bei jedem der angedachten Flottenanteile die entsprechende Ladeinfrastruktur sowie die Bestückung mit Wechselbatterien festgelegt werden. Es wird davon ausgegangen, dass der Pool bei der Verwendung von Blei-Batteriesystemen entweder mit zwei Wechselbatterien oder mit etwas mehr als anderthalb Wechselbatterien pro batterie-betriebenes Fahrzeug besteht. Es wurde angenommen, dass es beim großzügigeren Ausstattungsverhältnis möglich ist, von günstigeren Strombezugspreisen zu profitieren als bei der kleinstmöglichen Ausstattung.

Nach jetzigem Kenntnisstand müssten im CTA bei Komplettumstellung auf B-AGV zur Ausfallsicherung zwei Batteriewechselstationen errichtet werden (es ist fraglich, ob die Stationen einfach redundant ausgelegt werden oder ein Teilausfall hinnehmbar erscheint). Die **Tabelle 5** enthält eine Übersicht zu Lade- bzw. Tankstelleninfrastruktur in den jeweils angedachten Flottenanteilen der B-AGV und gegenübergestellten Flotten von E-AGV. Bei der Komplettumstellung mit Terminalerweiterung wäre denkbar, eine große BWS (mit Lade- und Batteriewechselkapazität von 80 Ladestellen) und eine kleine BWS (mit 40 Ladestellen) zu verwenden. Jedoch wäre dies mit Unsicherheiten verbunden, da bei einem Ausfall der großen BWS der Containerterminalbetrieb nur sehr eingeschränkt aufrechterhalten werden kann.

Tabelle 17: Lade- bzw. Tankstelleninfrastruktur in den jeweils angedachten Flottenanteilen der B-AGV und gegenübergestellten Flotten von E-AGV.

Flottenanteil	Ladeinfrastruktur		Tankinfrastruktur	
	Anzahl Stationen	Anzahl Ladestellen	Anzahl Tankstellen	Anzahl Tankpunkte
Vollausstattung mit B-AGV plus Terminalerweiterung	3	40	-	-
Vollausstattung mit B-AGV	2	40	-	-
Mittlere Durchmischung von B-AGV mit E-AGV	2	20	1	40
Geringfügige Durchmischung von B-AGV in E-AGV	1	20	1	20
Vollausstattung mit E-AGV	-	-	2	40
Vollausstattung mit E-AGV plus Terminalerweiterung	-	--	3	40

Der TCO-Analyse wurde eine Kosteneinschätzung für drei verschiedene Ausführungsarten der Batteriewechselstation (eine kleine BWS für etwa 10 B-AGV, eine mittlere BWS für etwa 40 B-AGV und eine große BWS für 80 B-AGV) zugrunde gelegt. Es wird diesbezüglich davon ausgegangen, dass die Wartungskosten für die Station proportional zu ihrer Lade- und Batteriewechselkapazität höher liegen. Weiter besteht die Annahme, dass bei einer größer ausgeführten BWS keine zusätzlichen Aufstellcontainer zur Unterbringung der Ladegeräteeinheiten mehr benötigt werden.

Die Analyseergebnisse werden in den nachfolgenden Abbildungen als normierte Größen angezeigt, das heißt die Investitionskosten für die jeweils gegenübergestellte E-AGV-Flotte werden als Referenzwert genommen. Es werden sowohl die über den Betrachtungszeitraum hinweg kumulierten Ausgaben als auch der Kapitalwert der E-AGV-Flotte und der Flotte mit B-AGV angegeben. Der Kapitalwert gibt die Summe aller diskontierten Auszahlungen innerhalb der Untersuchungsperiode wieder. Folglich gilt eine Investitionsalternative als relativ vorteilhaft, wenn der Kapitalwert geringer ist als der Kapitalwert der jeweils gegenübergestellten Investitionsalternative.

In **Abbildung 121** werden die Ergebnisse der TCO-Analyse für die Komplettumstellung des CTA mit 86 Fahrzeugen auf eine Flotte mit B-AGV einer Flotte von E-AGV gegenübergestellt vorgestellt. Es sind zwei Batteriewechselstationen mit je 40 Ladestellen einzurichten. Beim Vergleich zwischen dem kleinstmöglichen und dem großzügigen Ausstattungsverhältnis von Wechselbatterien zu Fahrzeugen wird ersichtlich, dass die Kapitalwerte in beiden Szenarien gleich hoch sind. So ergeben sich beim großzügigen Ausstattungsverhältnis neben den vergleichsweise geringere Energiekosten entsprechend höhere Kapitalausgaben. Insgesamt können durch die Umstellung der gesamten Flotte auf B-AGV im Schnitt fast 10 % an Investitionskosten eingespart werden.

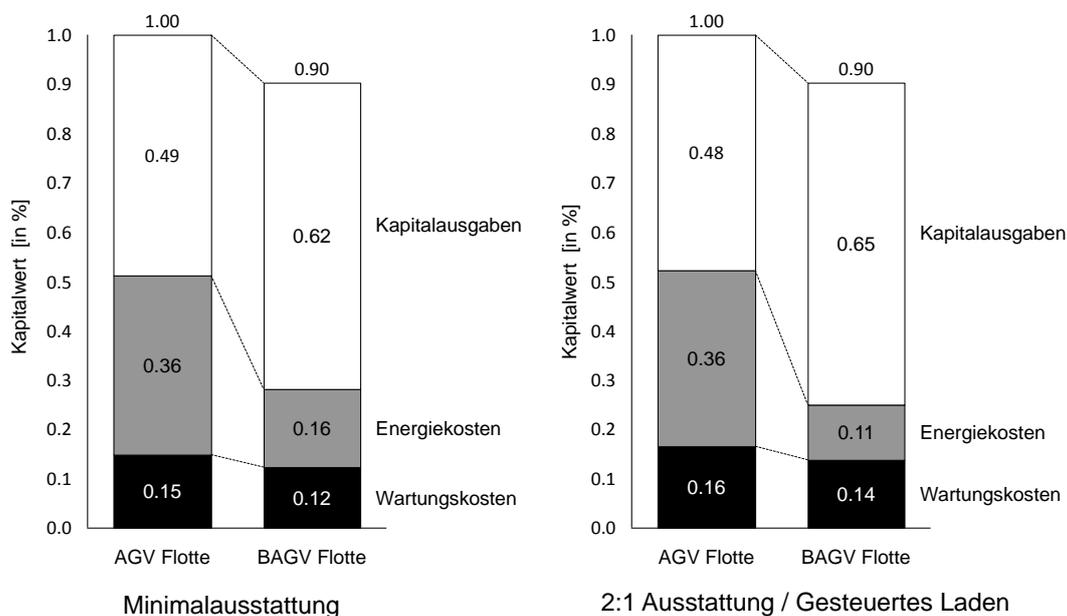


Abbildung 121: Ergebnis der TCO-Analyse beim Flottenanteilsszenario „Vollausstattung“

Die **Abbildung 122** zeigt die Ergebnisse der TCO-Analyse für die Teilumstellung des CTA mit einem Anteil von 43 B-AGV in einer Mischflotte von insgesamt 86 Fahrzeugen in der Gegenüberstellung zu einer reinen E-AGV-Flotte vorgestellt. Auf dem Terminalgelände sind zwei Batteriewechselstationen mit je 20 Ladestellen einzurichten. Die Summe aller diskontierten Auszahlungen innerhalb des Betrachtungszeitraums ist bei einer angedachten Teilumstellung geringfügig höher als bei der Komplettumstellung. Dies liegt darin begründet, dass anstelle zweier mittelgroßen Stationen die Einrichtung zweier mittlerer bis kleiner Stationen betrachtet wurde.

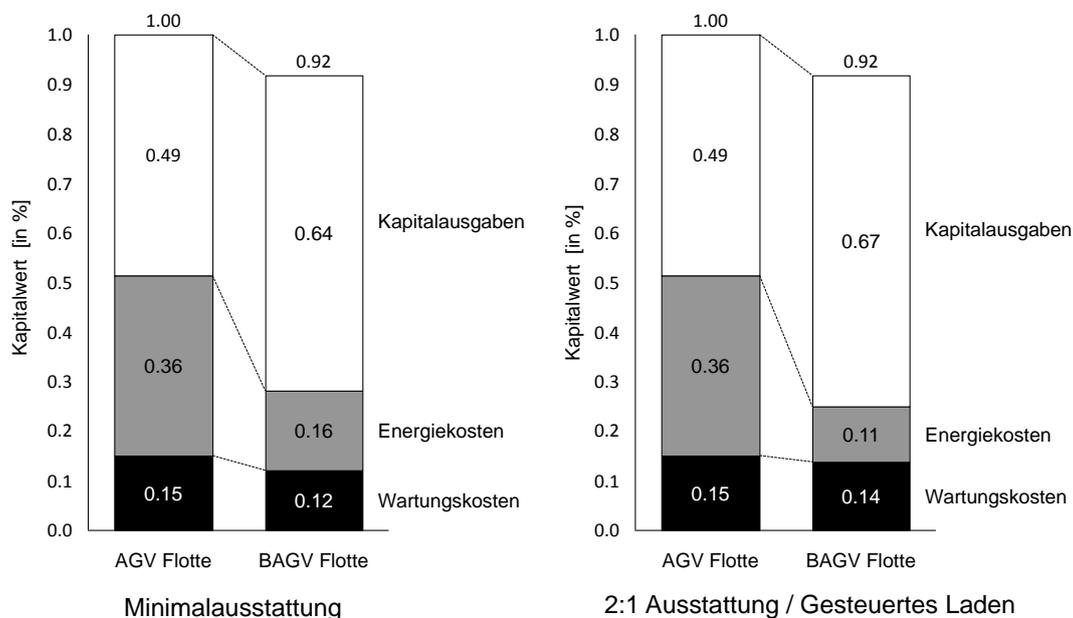


Abbildung 122: Ergebnis der TCO-Analyse beim Flottenanteilsszenario „Mischbetrieb 1“

Grundsätzlich konnte in diesem Investitionskostenvergleich bei größeren Anteilen von B-AGV-Flotte Skaleneffekte aufgedeckt werden. Dies soll heißen, dass größere Flotten mit B-AGV ökonomisch vorteilhafter sind als kleinere Flotten mit B-AGV.

4.5.3 Analyse der Übertragbarkeit

Es konnte gezeigt werden, dass der Containerterminal ein vorzügliches Einsatzgebiet für batterie-betriebene Fahrzeuge ist. Doch es dürften weitere Einsatzgebiete wie beispielsweise Stadtbusverkehr, Vorfeldverkehr im Flughafen oder auch Logistikverkehr in Verteilzentren existieren, welche ähnliche Umfeldfaktoren aufweisen wie der seeseitige Horizontaltransportverkehr eines Containerterminals.

Auf Basis der in **Tabelle 6** zusammengefassten Umfeldfaktoren wurde ein Kriterienkatalog für die Beurteilung verwandter Einsatzgebiete gebildet.

Tabelle 18. Erfolgsfaktoren für eine Verbreitung von Elektromobilität in verwandten Einsatzgebieten.

	Kriterium	Erklärung	Ideal für EM
Organisational	Unternehmerisches Nachhaltigkeitsbewusstsein	Verbesserung ökologischer Standards	Hoch
	Technik- und innovationsaffine Unternehmenskultur	Offenheit für technische Innovationen	Hoch
	Reduktion von lokalen Emissionen	Wichtigkeit der Reduktion von lokalen Emissionen (Lärm oder Schadstoffe)	Hoch
	Technische Betreuung	Verfügbarkeit von Technikern zur Durchführung von Wartungs- und Reparaturarbeiten	Hoch
	Nähe zu den Erzeugungsanlagen grüner Energie	Erhöhte Wahrscheinlichkeit der Nutzung grüner Energie	Hoch
	Regulatorische Anforderungen / Umfeld	Gesetzliche Anforderungen an Emissionsreduzierung sowie eine verschärfte Umweltgesetzgebung	Strikt
Technisch	Tourenlänge	Strecke, die ein Fahrzeug am Stück zurücklegen muss	Gering
	Tourenplanung	Planung von zukünftigen Touren der Fahrzeuge	Genau
	Ladeflexibilität	Ausreichend Kapazität zur Aufnahme und Abgabe von Energie zu Spitzen oder Engpässen	Hoch
	Zentrale Lademöglichkeit	Möglichkeit eine zentrale Lademöglichkeit auf dem Betriebsgelände zu errichten	Hoch
	Aktives Energiemanagement	Energiemanagement zur Steigerung der Energieeffizienz des Unternehmens	Hoch
	Verfügbarkeit von EVs und Ladeinfrastruktur	Verfügbarkeit von EVs und Ladeinfrastruktur, welche den Ansprüchen des Unternehmens gerecht werden	Hoch
	Fahrzeugtyp	Beschaffenheit der eingesetzten Fahrzeuge und Kompatibilität mit deren Umgebung	Hoch
Ökonomisch	Jahresfahrleistung	Durchschnittliche Fahrtleistung im Jahr	Hoch
	Flottengröße	Anzahl Fahrzeuge des Unternehmens	Hoch
	Unternehmensgröße	Stromverbrauch des Unternehmens	Hoch
	Anteil der Energiekosten	Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten und somit Relevanz für das Unternehmen	Hoch
	Anforderungen an Lade- bzw. Tankstelleninfrastruktur	Notwendige Implementierung einer BWS oder induktiven Lademöglichkeiten	Gering

4.5.3.1 Fallstudie Vorfeldbereich am Flughafen

Im Folgenden wird der Vorfeldbereich am Flughafen als Anwendungsgebiet der Forschungsergebnisse mit Hilfe einer Fallstudie zur Fraport AG untersucht. Die Fraport AG gehört international zu den führenden Unternehmen im Airport-Business und betreibt mit dem Flughafen Frankfurt eines der bedeutendsten Luftverkehrsdrehkreuze der Welt. Bei insgesamt ca. 500 Firmen und Institutionen arbeiten 78.000 Personen, davon sind 21.000 Be-

schäftigte allein bei Fraport¹⁵ tätig. Im Jahr 2014 begrüßte die Fraport AG am Flughafen Frankfurt 59,57 Millionen Fluggäste und fertigte 2,2 Millionen Tonnen Luftfracht ab. Täglich starten und landen hier durchschnittlich rund 1.400 Flugzeuge. Um dieses Verkehrsaufkommen¹⁶ abzuwickeln, wurden 3.271 Fahrzeuge eingesetzt, z.B. Pkw und Flugzeugschlepper, davon waren 471 Elektrofahrzeuge und 228 Hybridfahrzeuge. Hinzukamen 11.603 Anhängegeräte wie z.B. Containertransportwagen und Flugzeugtreppen sowie 4.210 Gepäckwagen¹⁷. Zur Fortbewegung dieser hohen Anzahl von Fahrzeugen ist eine sehr große Menge Energie bzw. Kraftstoff notwendig, die für einen starken Ausstoß von lokalen Emissionen verantwortlich ist. Für Anwohner, Mitarbeiter und Fluggäste spielt hierbei neben den Geräuschemissionen auch der Schadstoffausstoß eine wichtige Rolle. Für das Ziel die lokalen Emissionen zu reduzieren und ein nachhaltiges Unternehmen zu formen, bietet die EM eine vielversprechende Lösung. Dieser Lösungsansatz gepaart mit der bislang geringen Durchdringung von EM am Flughafen Frankfurt lässt die Anwendung der Forschungsergebnisse des BESIC-Projektes in diesem Einsatzgebiet als sehr reizvoll erscheinen. Um dies zu überprüfen werden nachstehend die identifizierten Erfolgskriterien des BESIC-Projektes in Bezug auf die Fraport AG bewertet.

Organisationale Kriterien

Aus der öffentlichen Selbstdarstellung Fraports lässt sich entnehmen, dass das Unternehmen ein starkes **Nachhaltigkeitsbewusstsein** entwickelt hat. So soll beispielsweise der CO₂-Ausstoß am Standort Frankfurt im Jahr 2020 pro Passagier beziehungsweise pro 100 Kilogramm Fracht um 30 Prozent geringer sein als 2005. Zur Umsetzung dieses Vorhabens hat Fraport 2012 im Rahmen des Bundesprogramms „Elektromobilität in Modellregionen“ das vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) geförderte Projekt E-PORT AN gestartet. Dieses umfasst verschiedene Teilprojekte zur Elektromobilität am Frankfurter Flughafen, deren Ziel es ist Fahrzeuge mit konventionellen Dieselantrieben schrittweise durch solche mit Elektroantrieb zu ersetzen. Dies ist bislang teilweise bei verbrauchsintensiven Fahrzeugtypen wie Palettenhubwagen, Schleppfahrzeugen und Förderbandwagen erfolgt. Aus E-PORT AN geht klar hervor, dass die Fraport AG, ähnlich wie die HHLA, eine **technik- und innovationsaffine Unternehmenskultur** besitzt, die den Einsatz von EM ideal unterstützt. Konkret werden im Fall des Frankfurter Flughafens bislang eine Passagiersolartreppe, ein Container-Palettentransporter, acht Palettenhubwagen, zwei Kleinbusse und 20 e-PKW seitens der Fraport AG elektrisch betrieben, wobei es sich bei den ersten beiden noch um Prototypen handelt. Darüber hinaus werden in Zusammenarbeit mit der Lufthansa drei Taxibots sowie ein Flugzeugschlepper (jeweils Prototypen) betrieben und ein elektrifizierter Catering-Truck befindet sich in der Entwicklung. Aufgrund der zentralen Lage des Flughafens in Frankfurt bestehen dort große Herausforderungen hinsichtlich von **lokalen Emissionen**. Für das Unternehmen ist eine Reduktion von Lärm und Schadstoffen daher besonders attraktiv. Einerseits um potenzielle Beschwerden und Klagen von Anwohnern zu verhindern und andererseits die Belastung der Mitarbeiter und Fluggäste während ihres Aufenthaltes am Flughafen möglichst gering zu gestalten.

Bezüglich der **technischen Betreuung** kann davon ausgegangen werden, dass Fraport innerhalb seiner Strukturen über die nötigen Fähigkeiten verfügt, um diese selbständig durchzuführen. Lediglich die **Nähe zu den Erzeugungsanlagen grüner Energie** ist aus Sicht des Standortes Frankfurt nicht ideal erfüllt. Die stark vom Standort abhängigen alternativen Energiequellen wie Wind- oder Solarenergie weisen in der Region nur ein geringes Potenzial auf und kommen daher nur auf einen geringen Anteil bei der Stromerzeugung. Anders sieht es bei

¹⁵ Fraport auf einen Blick, <http://www.fraport.de/de/konzern/ueber-uns/fraport-auf-einen-blick.html>.

¹⁶ Unternehmensporträt der Fraport AG 2015

¹⁷ Zahlen, Daten, Fakten 2014 zum Flughafen Frankfurt, <http://www.fraport.de/zahlendatenfakten/>

weiteren alternativen Energiequellen, wie beispielsweise der Stromerzeugung aus Biomasse aus, die in Hessen verhältnismäßig stark genutzt wird. Dennoch ist die Region insgesamt als eher schlecht zur Erzeugung grüner Energien zu bewerten und daher aus dieser Perspektive nicht ideal zur Weiterverbreitung von EM geeignet.

Ein weiteres Kriterium, das die EM gegenüber konventionellen Antriebsformen begünstigt, sind **regulatorische Anforderungen** an die Emissionsreduzierung und **verschärfte Umweltgesetze**. Da der Emissionsausstoß von schweren Nutzfahrzeugen auch am Frankfurter Flughafen sehr hoch ist, würde sich eine erweiterte Nutzung von EV diesbezüglich als effektives Instrument erweisen. Einerseits würde so die Einhaltung von Umweltgesetzen zu Schadstoffausstößen einfacher werden und andererseits würden EVs einen Beitrag zur Einhaltung der Lärmgrenzwerte liefern. Zusammenfassend lässt sich für die Anwendung der organisationalen Kriterien auf die Fraport AG am Standort Frankfurt festhalten, dass der intensiviertere Einsatz von EM als sehr reizvoll zu beurteilen ist.

Technische Kriterien

Eine wichtige Rolle nimmt dabei die **Tourenlänge** der eingesetzten Fahrzeuge ein. Im Fall von Fraport ergibt sich durch den lokal begrenzten Einsatz der Fahrzeuge sowie der Größe des Betriebsgeländes von ca. 22 Hektar eine begrenzte Tourenlänge. Ähnlich wie beim CTA lässt sich anhand der Ankunfts- und Abflugzeiten die **Tourenplanung** ausreichend im Voraus steuern. Auch die bestehenden Ruhezeiten von 23-05 Uhr helfen bei der Ausgestaltung der Ladeprozesse und liefern einen wichtigen Eckstein für das Batteriemanagement. Hieraus ergibt sich im Zusammenhang mit der Anzahl der verfügbaren Batterien die **Ladeflexibilität**.

Da aktuell auf einzelne Ladestellen bzw. –säulen gesetzt wird, bietet sich die Möglichkeit, den Weg eines Fahrzeugs zu einer Ladesäule durch eine gleichmäßige Verteilung der Ladestellen relativ kurz zu halten. Aufgrund der vorhandenen Infrastruktur kommt eine BWS nur am neuen Terminal in Frage, da die anderen Terminals nicht über genügend freie Fläche verfügen¹⁸. Aufgrund der großen Platzersparnis würde sich induktives Laden am Frankfurter Flughafen als ideal anbieten, allerdings sind die Kosten für eine derartige Lösung derzeit noch zu hoch.

Ein weiteres Kriterium sieht ein **aktives Energiemanagement** vor, dass die Steigerung der Energieeffizienz verfolgt. In diese Richtung hat Fraport bereits einige Schritte unternommen, wodurch Einsparungen bei Betriebs- und Unterhaltungskosten in Millionenhöhe realisiert wurden¹⁹. Hieraus geht hervor, dass Fraport stark an einer erhöhten Energieeffizienz interessiert ist, um so Kosten einzusparen und umweltschonend zu handeln. Letztendlich ist es zur Nutzung von EM essentiell, dass am Markt die erforderlichen **EVs und die Ladeinfrastruktur** in guter Qualität **verfügbar** sind. Da Fraport die Elektrifizierung weiterer Fahrzeuggattungen auch in Zukunft plant, werden laut Unternehmen die entsprechenden Märkte genau beobachtet und Fahrzeuge dann in Einsatz gebracht, wenn dies sinnvoll erscheint. Aktuell besteht also eine Beschränkung auf die bereits eingesetzten Fahrzeugtypen und die installierte Ladeinfrastruktur. In Bezug auf die bereits eingesetzten Fahrzeugtypen zeigt sich durch die eigene Entwicklung eines eSchleppers mit der schwedischen Kalmar AG²⁰, dass nicht davor zurückgeschreckt wird, notfalls selbst bei der Erstellung von Fahrzeugtypen aktiv zu werden. Ferner hat sich im Bereich der Fracht- und Gepäckschlepper eine Industrie gebildet, die ein Angebot für Firmen wie Fraport bereitstellt.

¹⁸ Gesprächsnotizen einer Feldbesichtigung am Frankfurter Flughafen in 2015

¹⁹ Die Energie Experten. 2015. Umfangreiche Energieanalyse am Frankfurter Flughafen – Fraport spart in den kommenden Jahren Millionenbetrag

²⁰ Aerosieger. 2015. eSchlepper: Plug-in-Hybrid für Schleppvorgänge

Bezüglich der auf dem Markt verfügbaren Ladeinfrastruktur fällt das Urteil unterschiedlich aus. Für Ladesäulen oder eine BWS ließen sich Lösungen finden, für das Angebot an passenden induktiven Ladesystemen zu attraktiven Preisen besteht noch ein Vakuum. Induktives Laden könnte eine Option werden, falls diese Technologie weiter voranschreitet und die Kostengrundlage sich zum Positiven hin ändert. Insgesamt kann auch aufgrund der bereits erfolgten Tests durch das Projekt E-PORT AN im Bereich der technischen Erfolgsfaktoren eine Übertragung der Forschungsergebnisse des BESIC-Projektes auf die Fraport AG positiv bewertet werden.

Ökonomische Kriterien

Angesichts einer Betriebsdauer der Flugzeugschlepper und Frachtschlepper von ca. 2.000 Stunden sowie ca. 1.500 Stunden für die Gepächtschlepper trifft im Fall von Fraport definitiv die Einteilung einer hohen **Jahresfahrleistung** zu. Dies wirkt sich äußerst positiv auf die Kompensation der hohen Anschaffungskosten durch die niedrigen Betriebskosten aus. Außerdem verfügt Fraport mit über 23.000 Fahrzeugen und Geräten über eine sehr hohe **Flottengröße**, die im Falle einer Ausweitung der EM zu signifikanten Skaleneffekten führen würde. Mit derzeit 471 Elektro- und 228 Hybridfahrzeugen hat Fraport bereits Schritte in diese Richtung unternommen. Ein weiterer Vorteil der großen Flotte besteht in der damit verbundenen Speicherkapazität, die eine größere Flexibilität beim Laden mit sich bringt.

Aus der reinen **Größe des Unternehmens** lassen sich für Fraport jedoch keine Vorteile ableiten, da beispielsweise eine Befreiung der EEG-Umlage nicht in Frage kommt. Trotzdem die Fraport AG nicht als energieintensives Unternehmen eingestuft ist, verursacht es mit 1.100 Mio. kWh im Jahr einen sehr großen Stromverbrauch. Stündlich entstehen so für Fraport Energiekosten in Höhe von 11.000€. Daher ist der relative **Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten** von großer Relevanz für Fraport. Dieser hohe Anteil rechtfertigt für die Fraport AG die besonders starken Bemühungen zur Reduzierung des Stromkonsums. So ist es Fraport gelungen ein Bewusstsein für Nachhaltigkeit und Umweltschutz zu schaffen und folglich möglichst viele Bereiche des Unternehmens auf ihre Energieeffizienz hin zu untersuchen. Dies bringt einerseits geringere Energiekosten mit sich und andererseits wirkt es sich positiv auf das Image von der Fraport AG in der Öffentlichkeit aus. Deshalb lohnt es sich aus Sicht von Unternehmen mit einem hohen Anteil an Energiekosten außerordentlich sich in diesem Bereich zu verbessern.

Am Frankfurter Flughafen stehen die **Anforderungen an die Ladeinfrastruktur** in enger Abstimmung mit den **Anforderungen an die Mobilitätsleistung**. Aufgrund der vorliegenden Infrastruktur und des geringen Platzangebotes erscheint das Laden der EVs über induktive Energieübertragung bzw. im Fall des neuen Terminals eine BWS am geeignetsten. Diese Formen weisen zwar höhere Kosten als beispielsweise einfache Ladesäulen auf, können jedoch eine permanente Flottenverfügbarkeit sicherstellen. Für den Einsatz einer BWS spricht, dass diese bereits am CTA erfolgreich getestet wurde und ebenfalls die Einhaltung der Logistikprämisse unterstützt hat. Das induktive Laden²¹ weist zwar ein sehr großes Potenzial auf, welches höchstwahrscheinlich in Zukunft auch abgerufen wird. Jedoch bestehen noch diverse Schwierigkeiten, die in der Entwicklung gelöst werden müssen und so einen sofortigen, unkomplizierten Einsatz verhindern. Für die Platzierung von mehrerer Ladepunkte würde sprechen, dass die benötigte Kapazität der Batterien möglichst gering gehalten werden könnte und sich dies positiv auf die Beschaffungskosten auswirken würde. Im Fall der Fraport AG wird die Beurteilung der EM, wie beim BESIC-Vorhaben am Standort des CTA, über die Total Cost of Ownership (TCO) vorgenommen, was

²¹ Induktives Laden: Die urbane Lösung von morgen?, Bundeverband eMobilität e.V., [<http://www.bem-ev.de/induktives-laden/>]

eine Übertragbarkeit hinsichtlich der Anforderungen an die Mobilitätsleistung gewährt. Darüber hinaus wird erwartet, dass EVs die gleichen Leistungen erbringen sollen wie konventionelle Fahrzeugtypen und somit kein Nachteil für das Unternehmen entsteht. Da sowohl beim BESIC-Vorhaben als auch beim Projekt E-PORT AN verschiedene Fahrzeugtypen erfolgreich mit Elektroantrieb im Vergleich zu konventionellen Varianten getestet wurden, ist davon auszugehen, dass die Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll ist.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Fraport AG am Flughafen Frankfurt sehr viele der Erfolgskriterien des BESIC-Vorhabens erfüllt. Sowohl organisational, technisch als auch wirtschaftlich scheint die Übertragung der Forschungsergebnisse durchführbar. Lediglich sehr wenige Punkte, wie beispielsweise die Nähe zu den Erzeugungsanlagen grüner Energien, konnten nicht erfüllt werden. Bei vielen dieser Erfolgskriterien dürfte sich allerdings ein Wandel zum Positiven innerhalb der nächsten Jahre auch durch Bemühungen in Pilotprojekten wie beispielsweise E-PORT AN ergeben. Insgesamt ergibt sich also ein sehr positives Bild für den vermehrten Einsatz von EM im Vorfeldbereich am Flughafen.

4.5.3.2 Fallstudie Großlagerlogistik im Versandhandel (Flurförderfahrzeuge)

Im Folgenden wird der Bereich der Großlagerlogistik im Versandhandel als Anwendungsfeld der Forschungsergebnisse mit Hilfe einer Fallstudie zum Unternehmen Amazon.com in Deutschland untersucht. Amazon.com ist ein international führender Online-Versandhändler mit einer sehr diversifizierten Produktpalette. Der deutsche Markt ist für Amazon von großer Bedeutung, da hier 2014 mit 11,92 Milliarden US-Dollar gut 13 % des weltweiten Umsatzes erzielt wurden²². Zur Erzielung dieses Umsatzes setzt Amazon auf ein ausgefeiltes Logistiksystem, welches aus neun Logistikzentren an acht Standorten besteht, die sich hauptsächlich auf den Süden Deutschlands verteilen. Insgesamt ergibt sich daraus eine Logistik-Gesamtfläche von 860.000 m² und einer Lagerkapazität von mehr als drei Millionen Kubikmetern. Vor Ort sind mehr als 10.000 Vollzeitmitarbeiter angestellt, deren Zahl saisonal noch weiter erhöht wird²³. Um das große Volumen an Auslieferungen zu bewerkstelligen, setzt Amazon auf verschiedene Typen von Flurförderfahrzeugen in den Logistikzentren.

Organisatorische Kriterien

Im Rahmen des Strebens nach unternehmerischer Nachhaltigkeit bemüht sich Amazon in der Öffentlichkeit ein positives Selbstbild darzustellen, dazu gehören verschiedene Initiativen, wie beispielsweise recyclingfähige Verpackungen und ressourcenschonende Bürogebäude²⁴. Jedoch betreffen diese Initiativen nur einen Bruchteil der potentiellen Bereiche in denen ein **unternehmerisches Nachhaltigkeitsbewusstsein** zu einer verbesserten Umweltschonung führen könnte. Besonders die Logistik bietet im Fall von Amazon große Potentiale zur Umweltschonung. Allerdings wird die Umsetzung umweltschonender Maßnahmen durch die hohen Anforderungen an die Zustellgeschwindigkeit zu den Kunden zusätzlich erschwert. Im Gegensatz dazu ist das Erfolgskriterium **der technik- und innovationsaffinen Unternehmenskultur** für Amazon eindeutig zu bejahen.

Für die Logistikzentren ist eine **Reduktion der lokalen Emissionen** von hohem Stellenwert, da so die Belastung für die Mitarbeiter vor Ort gesenkt werden kann. Da diese i.d.R. in geschlossenen Räumen unterwegs sind, spielen sowohl die Schadstoffemissionen an dieser Stelle als auch die Lärmbelastung eine Rolle. Auf diesem Gebiet

²² Statista. Nettoumsatz von Amazon in Deutschland und weltweit in den Jahren 2010 bis 2014

²³ Amazon.com, Inc. Amazon und unser Planet [<http://www.amazon.de/unser-planet/>]

²⁴ Amazon.com, Inc. Über uns: Wichtiger Arbeitgeber in den Regionen [<http://www.amazon-logistikblog.de/fakten/>]

ist Amazon besonders bemüht Verbesserungen einzuführen, da das Unternehmen sich in jüngerer Vergangenheit häufig mit negativen Schlagzeilen zu den Arbeitsbedingungen konfrontiert sah. Aus organisationaler Sicht muss außerdem die Frage gestellt werden, ob Amazon über die Kompetenzen verfügt, die zur **technischen Betreuung** einer EV-Flotte nötig sind. Erfahrung mit den jeweiligen Fahrzeugtypen ist definitiv gegeben und sollte ohne größere Probleme auf den Einsatz von EM ausgeweitet werden können, sodass die Umsetzung dieses Kriteriums als positiv zu bewerten ist.

Bezüglich der **Nähe zu Erzeugungsanlagen grüner Energie** kann festgehalten werden, dass durch das bestehende Netz aus Logistikzentren, welches sich hauptsächlich im Süden Deutschlands befindet, eine gewisse Distanz zur größten alternativen Energiequelle, der Windenergie, besteht. Allerdings kompensieren der deutschlandweite Ausbau der Windenergie und der verstärkte Einsatz von Solarenergie in Süddeutschland diesen Faktor teilweise. Deshalb ist dieser Erfolgsfaktor für Amazon als moderat einzustufen. Abschließend lässt sich zu der Bewertung der organisationalen Erfolgskriterien festhalten, dass Amazon sehr wohl ein positiveres Image durch den Einsatz von EM gewinnen könnte, dies allerdings teilweise in Konflikt mit zentralen Bestrebungen des Unternehmens steht.

Technische Kriterien

Im nächsten Schritt erfolgt die Beurteilung der technischen Erfolgskriterien aus dem BESIC-Vorhaben. Da die Kapazitätsbegrenzungen für die EM bislang noch einen limitierenden Faktor darstellen, sind die begrenzten Flächen der Logistikhallen als sehr positiv zu bewerten, da so in gleichem Maße die **Tourenlängen** der eingesetzten Flurförderfahrzeuge begrenzt werden. Dieses Kriterium wird also seitens Amazons voll erfüllt. Bezüglich der **Tourenplanung** ist es etwas schwieriger eine Aussage zu treffen. Einerseits können Aufträge priorisiert oder einfach zeitlich gestaffelt werden. Andererseits kann es aufgrund des Lieferversprechens am nächsten Tag mit Amazon Prime zu notwendigen, kurzfristigen Änderungen in der Tourenplanung der Flurförderfahrzeuge kommen. Daher kann dieses Erfolgskriterium nicht als eindeutig positiv bewertet werden. Mit Hinblick auf das nächste Kriterium, die Logistikprämisse, sollte der Implementierung einer BWS oder des induktiven Ladens ein hoher Stellenwert zugeordnet werden. Für Amazon ist es essentiell die bestellten Artikel so schnell wie möglich an die Kunden auszuliefern und somit möglichst wenig Zeit in den Logistikzentren zu verlieren. Durch den Einsatz einer BWS beispielsweise lassen sich durch langwierige Ladephasen bedingte Unterbrechungen vermeiden, sodass die Abfertigung der Pakete schneller erfolgen kann.

Für den Punkt der **Ladeflexibilität** wäre das Verhältnis der Anzahl der vorhandenen Wechselbatterien zu den genutzten EVs von großer Wichtigkeit, um so zu bestimmen, wie viele Wechselbatterien als temporärer Speicher von Strom dienen könnten. Da im Falle von Amazon kleinere Fahrzeugtypen als beim CTA und somit auch kleinere Batterien eingesetzt werden, wird die Speicherkapazität deutlich geringer ausfallen. Ferner schränkt der 24/7-Betrieb in den Verteilzentren eine Ausnutzung von Flexibilität der Ladeprozesse ein. Dies deutet auf eine deutlich begrenztere Ladeflexibilität für Amazons Logistikzentren hin, weshalb dieses Kriterium als negativ einzustufen ist. Bezüglich der Möglichkeit eine **zentrale Lademöglichkeit** für die EVs in den Logistikzentren einzurichten, wirkt es sich sehr positiv aus, dass Amazon bei der Errichtung der Logistikzentren Raum für zukünftige Erweiterungen eingeplant hat. Diese könnten teilweise als Platz für eine BWS dienen oder es könnte über die Implementierung von induktivem Laden nachgedacht werden.

Im Fall von Amazon ist das bereits vorhandene **aktive Energiemanagement** stark begrenzt. Besonders im Vergleich zum CTA ist die Stromlast zeitlich deutlich ausgewogener verteilt und aufgrund der kleineren Fahrzeugtypen auch nicht so hoch wie beim Containertransport. Jedoch erscheint die Einbindung eines aktiven Energiema-

nagements durch das Smart Grid in die Digitalisierungsstrategie Amazons durchaus attraktiv und sollte im Falle einer detaillierteren Auseinandersetzung mit dem Thema stärker berücksichtigt werden. Aufgrund der bereits am Markt verfügbaren Produkte im Bereich der Flurförderfahrzeuge, kann das Erfolgskriterium der **Verfügbarkeit von EVs und Ladeinfrastruktur** für Amazon bejaht werden. Verschiedene Hersteller bieten passende Lösungen an, was sich in einem Absatzvolumen von 56.405 Elektro-Gabelstaplern²⁵ im Jahr 2013 in Europa widerspiegelt.

Als letztes Kriterium des technischen Bereichs erfordert der notwendige **Fahrzeugtyp** für die EM in den Logistikzentren keine fundamentalen Anpassungen. Da, wie bereits erwähnt, die Fahrzeugtypen kleiner sind und kürzere Strecken befahren, nimmt der benötigte Raum für die Batterien im EV deutlich ab. Es sind keine Entwicklungen neuer Fahrzeugtypen notwendig, da sich diese bereits im Einsatz befinden und auch schon in dem speziellen Umfeld erprobt sind. Derzeit wird die Mehrzahl an Flurförderfahrzeugen zwar noch konventionell betrieben, allerdings erfährt die Anzahl der EVs in diesem Bereich ein stetes Wachstum. Deshalb ist dieses Erfolgskriterium als nahezu voll gegeben zu bewerten, wodurch keine größeren Kosten entstehen dürften.

Zusammenfassend für die technischen Erfolgskriterien lässt sich festhalten, dass die Logistikzentren generell geeignet sind, da beinahe alle Faktoren positiv bewertet wurden. Lediglich die geringe Ladeflexibilität und eventuelle auftretende Herausforderungen bei der Tourenplanung stehen einer sehr positiven Bewertung im Wege.

Ökonomische Kriterien

Im dritten Schritt sollen die ökonomischen Kriterien auf eine Anwendung bei Amazon beurteilt werden. Dabei steht besonders die **jährliche Fahrleistung** im Vordergrund, die aufgrund des 24-Stunden Betriebes in den Logistikzentren als sehr hoch einzuschätzen ist. Ähnlich dem Fallbeispiel Fraport ist auch hier die jährliche Fahrleistung als sehr positiv zu bewerten, da so die hohen Anschaffungskosten durch geringere laufende Kosten kompensiert werden können. Zur Flottengröße in den Logistikzentren macht Amazon keine Angaben. Insgesamt wurden im Jahr 2013 317.000 Flurförderfahrzeuge in Europa ausgeliefert. Die breite Einführung von EVs in den deutschen Logistikzentren Amazons könnte aufgrund der **Unternehmensgröße** einen weitreichenden Einfluss haben, da Amazon über eine große Anzahl von Logistikzentren in vielen Ländern verfügt und sie diesem Beispiel folgen könnten. Außerdem korreliert mit der Unternehmensgröße auch der Strombedarf, der bei größeren Unternehmen besser geplant und durch gesteuerte Ladevorgänge zu relativ geringeren Energiekosten führen kann. Dies betrifft auch ein weiteres Erfolgskriterium, das des **Anteils der Energiekosten an den Gesamtkosten**. In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass auf der Logistikbranche insgesamt ein sehr hoher Kostendruck lastet, der die Unternehmen vermehrt dazu veranlasst, Kosteneinsparpotenziale zu identifizieren und zu nutzen. Dies trifft auch auf Amazon zu, wo aufgrund des Transports der Waren ein beachtlicher Teil der Kosten für Strom und Kraftstoff anfällt. Daher kann dieses Kriterium aus Sicht von Amazon ebenfalls positiv beurteilt werden.

Bezüglich der **Anforderungen an Lade- bzw. Tankstelleninfrastruktur** ist es essentiell für Amazon und weitere Logistikunternehmen, dass möglichst keine Störungen oder Unterbrechungen des Transportgeschehens vorkommen. Das Laden der eingesetzten Flurfahrzeuge soll also möglichst wenig Zeit einnehmen, was durch die Implementierung einer BWS ideal umgesetzt werden könnte. Aufgrund der sehr variablen Routen der Fahrzeuge stellt für die Implementierung von induktivem Laden die Wahl der richtigen Standorte ein großes Problem dar.

²⁵ Statista. Weltweiter Absatz von Elektro-Gabelstaplern nach Region im Jahr 2013 (in Stück)

Aus diesen Gründen erscheint für die Logistikzentren von Amazon eine BWS am attraktivsten. Hinsichtlich der wirtschaftlichen Erfolgskriterien scheint eine Übertragung der Forschungsergebnisse auf die Logistikzentren Amazons sinnvoll. Jedoch bleibt die Flottengröße hier eine große Unbekannte, die großen Einfluss auf das Wirtschaftlichkeitspotenzial der EM besitzt. Sollte diese Größe zu niedrig ausfallen, verlieren die restlichen positiv eingestuften Erfolgskriterien stark an Bedeutung.

Abschließend kann ein mäßiges Urteil über die Eignung Amazons zur Übertragung der Ergebnisse aus dem BESIC-Forschungsvorhaben gefällt werden. Aus organisationaler Perspektive wiegt das schwache unternehmerische Nachhaltigkeits- und Umweltbewusstsein gepaart mit den geringen Anforderungen an Emissionsreduzierungen am schwersten. Dem entgegen würden die technischen Faktoren kein Hindernis darstellen. Letztendlich stellen die ökonomischen Erfolgskriterien ein großes Problem für die Erkenntnisübertragung auf Amazon dar, da diese aufgrund der unbekanntenen Flottengröße nicht sinnvoll bewertet werden kann.

4.5.3.3 Fallstudie Busnahverkehr im offenen Logistiksystem

Im Folgenden wird der Bereich des Busnahverkehrs im offenen Logistiksystem als Anwendungsfeld der Forschungsergebnisse mit Hilfe einer Fallstudie zum Unternehmen Bremer Straßenbahn AG (BSAG) untersucht.

Die BSAG ist ein kommunales Verkehrsunternehmen, welches beinahe vollständig der Stadt Bremen gehört. Es betreibt den Großteil des öffentlichen Personennahverkehrs in Bremen, maßgeblich durch die Straßenbahnen und den Stadtbusverkehr. Die BSAG befördert täglich fast 300.000 Menschen²⁶, was zu einem Jahresvolumen von 105 Millionen Fahrgästen führt. Um dies zu bewältigen setzt die BSAG knapp 2.000 Angestellte ein, von denen der Hauptteil im Fahrdienst beschäftigt ist. Sie sorgen für den reibungslosen Verkehr der insgesamt 120 Straßenbahnen und 201 Busse, die das Streckennetz befahren. Das Streckennetz beinhaltet 8 Straßenbahn- und 45 Buslinien, die 1.195 Haltestellen anfahren auf einem Einzugsgebiet von 424,56 km². Die Fahrleistung pro Jahr liegt bei 21,39 Millionen km, was den hohen Ausstoß an CO₂-Emissionen von 28.342 Tonnen pro Jahr begründet. Aus diesem Grund gibt es innerhalb der BSAG Bestrebungen konventionelle Fahrzeugtypen durch elektrifizierte auszutauschen und somit den selbst gesteckten Nachhaltigkeitszielen näher zu kommen. Die Elektromobilität könnte also eine passende Lösung für die Herausforderungen der BSAG sein. Um dies zu überprüfen, sollen im Folgenden die Erfolgskriterien des BESIC-Vorhabens auf das Fallbeispiel der BSAG angewandt werden.

Organisationale Kriterien

Zu Beginn sollen die organisationalen Erfolgskriterien überprüft werden, allen voran das **unternehmerische Nachhaltigkeitsbewusstsein** des betreffenden Unternehmens. Wie aus dem Nachhaltigkeitsbericht der BSAG hervorgeht, legt das Unternehmen neben der sozialen und ökonomischen Nachhaltigkeit besonderen Wert auf die ökologische Nachhaltigkeit. Hierzu wurden unternehmensintern verschiedene Klimaschutzkennziele eingeführt und beinahe vollständig erreicht. Bezüglich der **technik- und innovationsaffinen Unternehmenskultur** lässt sich festhalten, dass die BSAG den Einsatz neuer Fahrzeugtypen engagiert vorantreibt und an dieser Stelle auch Pionierarbeit leistet. Allerdings sieht man sich selber mehr in der Anwenderrolle, anstatt großen Anteil am Forschungsbereich nehmen zu wollen.

Hinsichtlich der **Reduktion von lokalen Emissionen** folgt die BSAG den Vorgaben des Landes Bremen, die CO₂-Emissionen bis 2020 um 15 % gegenüber dem Basisjahr 2010 zu senken. Schadstoffemissionen konnten

²⁶ BSAG. BSAG-Kurzportrait [http://www.bsag.de/de/unternehmen/ueber-uns/bsag-kurzportrait.html]

durch die Einführung neuer Busse bereits stark reduziert werden. Das größte Problem in diesem Bereich besteht im Ausstoß von Stickoxiden, welche beim Betrieb der Klimaanlage entweichen. Dieses Mittel tritt besonders bei älteren Bussen aus und hat ein erhebliches Treibhauspotenzial. Eine Verringerung der Lärmemissionen ließe sich durch den vermehrten Einsatz von Elektrobussen in Zukunft noch besser erreichen. Der Einsatz von EM gepaart mit neuen Bussen und Klimaanlage würde also den Pegel der lokalen Emissionen auf ein akzeptables Maß begrenzen. Im Rahmen des Projektes „Elektromobilität im Bussystem emoB“ testet die BSAG bereits seit 2013 Elektrobusse und befasst sich mit dieser Thematik. Bislang wurde die Wartung der eingesetzten Pilotbusse von externer Stelle übernommen. In nächster Zeit soll die **technische Betreuung** jedoch durch Schulungen intern vorgenommen werden. Dabei kann auf vorhandene Expertise und Erfahrung mit Straßenbahnen zurückgegriffen werden.

Das nicht zwingende, aber als sehr positiv zu bewertende Erfolgskriterium der **Nähe zu den Erzeugungsanlagen grüner Energie** ist im Fall der BSAG bzw. des Standortes Bremen als voll gegeben zu beurteilen. Aufgrund der Nähe zu Windkraftanlagen könnte durch den Einsatz von EM gewährleistet werden, dass die konsumierte Energie zu einem sehr hohen Prozentsatz aus regenerativen Quellen stammt. Dies würde einhergehen mit den **regulatorische Anforderungen bzw. dem gesetzgebenden Umfeld**, die eine zusehends stärkere Einbindung von EVs und grüner Energie in den Strommarkt fordern. Dass die BSAG bereit ist diesen Zielen aus freien Stücken zu folgen, zeigt die Verfolgung der Vorgaben durch das Land Bremen wie eingehend erwähnt. Zusammenfassend kann aus Sicht der organisationalen Erfolgskriterien die Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse des BESIC-Projektes auf die BSAG als sehr positiv eingestuft werden.

Technische Kriterien

Zentral ist bei den technischen Kriterien unter anderem die **Tourenlänge** der eingesetzten Fahrzeugtypen. Für die Großzahl der eingesetzten Busse gestaltet sich der Betrieb derart, dass sie tagsüber im Einsatz sind und über Nacht zum Betriebshof zurückkehren. Da seitens der BSAG ausschließlich Lademöglichkeiten auf dem Betriebshof geplant sind, stellen zu lange Strecken der Busse ein stark restriktives Kriterium für den Einsatz von EM dar. Bezüglich der **Tourenplanung** lassen sich recht präzise Aussagen über Umfang und Dauer der Fahrten treffen. Der Einsatz der Busse kann also gut geplant werden und die Batterieeinsatzplanung somit prognostiziert werden.

Bisherige Erkenntnisse haben gezeigt, dass im Fall von Elektrobussen **Ladeflexibilitäten** lediglich nachts – wenn sich die Fahrzeuge auf dem Betriebshof befinden – ausgenutzt werden können. Gleichzeitig ergibt sich hieraus eine eindeutige Notwendigkeit, nämlich, dass eine ausreichende ausgebaute Ladeinfrastruktur auf dem Betriebshof vorhanden ist. Aktuell wird in der BSAG über die Beschaffung von 100 kW-Ladegeräten nachgedacht. Durch die hohe Ladegeschwindigkeit entstehen eventuell Ladeflexibilitäten, welche ökonomisch verwertet werden können. Im Kontext der Nachhaltigkeitsbemühungen der BSAG wird länger auf ein **aktives Energiemanagement** gesetzt. Dies fördert die Einbindung der Ladeprozesse in ein Smart Grid.

Zentral für den Betrieb von EM ist für die BSAG, dass die Logistikprämisse, also der Transport von Fahrgästen, nicht durch den Einsatz von EM beeinträchtigt wird. An dieser Stelle bietet sich der BSAG durch die EM eine Chance, da aufgrund des elektrifizierten Antriebs der Fahrzeuge der Komfort für den Fahrgast sogar steigt. Das Ruckeln beim Anfahren entfällt und auch die unangenehmen Schadstoffemissionen spielen keine Rolle mehr.

Aufgrund der erfolgreichen Einsätze der Elektrobusse verschiedener Hersteller war die BSAG in der Lage Erfahrungen mit den unterschiedlichen Modellen zu sammeln. Aktueller Stand ist, dass der EURABUS 2.0 von der Firma EURACOM der geeignetste Kandidat ist. Der EURABUS fährt mit chinesischer Antriebstechnik, beinhaltet

aber auch deutsche Komponenten²⁷. Nach Abschluss der Testphase ist eine Einführung des Eurabus geplant. Dieser soll dann über eine Kapazität von 576 kWh und 300 km Reichweite verfügen. Derzeit ist eine Ausschreibung für dieses Modell geplant, welches nach erfolgreichem Betrieb in den ersten zwei Jahren durch weitere EV Verstärkung bekommen soll. Generell plant die BSAG ab 2016 bei Neu- und Ersatzbeschaffungen auf elektrische Antriebe umzusteigen, sodass im Jahr 2026 das Ziel eines vollkommen emissionsfreien Betriebes erreicht werden kann.

Die Ladung der EVs bei der BSAG erfolgt bislang nachts auf dem Gelände des Betriebshofs. Hierfür sollen in naher Zukunft Ladesäulen angeschafft werden, um den Ladevorgang zu vereinfachen. Anschlüsse und Transformatoren sind in einem Versorgungssystem für eine Leistung von 100 kW bereits vorhanden. Diese konkrete Planung zeigt, dass die notwendige **Verfügbarkeit von EVs und** die dazu passende **Ladeinfrastruktur** am Markt gegeben ist. Der bereits beschriebene Fahrzeugtyp kann die konventionellen Varianten beinahe leistungsgerecht ersetzen und passt aufgrund der massiven Emissionsreduzierung sehr gut in das Umfeld im Bremer Transportwesen. Bei einer durchschnittlichen Reichweite von 250 km könnten bereits 75% der 12 Meter langen Busse auf EVs umgestellt werden. Die technischen Erfolgskriterien können folglich mehrheitlich als positiv bewertet werden, jedoch verkörpern die aufgezeigten Probleme bei der Erfüllung der Tourenlänge durch die Fahrzeugtypen bei gegebener Ladeinfrastruktur ernsthafte Hindernisse für die flächendeckende Einführung der EM für die BSAG.

Ökonomische Kriterien

Der nächste Abschnitt wird sich mit der Erprobung der ökonomischen Erfolgsfaktoren, also den Wirtschaftlichkeitsfaktoren, bei der BSAG beschäftigen. Zuerst sollte die hohe **Jahresfahrleistung** der Busse hervorgehoben werden. Im Vergleich zu konventionellen Antrieben besticht die EM mit geringen laufenden Kosten, die im Idealfall die höheren Anschaffungskosten gegenüber den dieselbetriebenen Bussen rechtfertigen. Gleichmaßen wirkt sich eine hohe **Flottengröße** auf die Wirtschaftlichkeit aus, da so Kostenvorteile realisiert werden können. Diese beziehen sich beispielsweise auf das Verhältnis der Anzahl der Elektrobusse zu Ladesäulen oder Wartungspersonal. Je größer die Anzahl der EVs ist, desto geringer werden die pro EV entstehenden Kosten. Maßgeblich sind hierbei die Fixkosten. Der **Anteil der Energiekosten** an den Gesamtkosten bleibt trotz des Einsatzes neuer Busse erheblich. Aus Sicht der EM ist dies eine wünschenswerte Situation, da ihr Einsatz ein probates Mittel zur Senkung dieses großen Kostenblocks ist. Gleichzeitig sollte die BSAG bei der Suche nach Einsparpotenzialen besonders auf die Energiekosten schauen, da aufgrund des hohen Anteils an den Gesamtkosten an dieser Stelle ein großer Hebel vorhanden ist.

Bezüglich der Anforderungen an **Lade- bzw. Tankstelleninfrastruktur** wäre wahrscheinlich das induktive Laden für die Elektrobusse die bestmögliche Lösung. Aufschlussreiche Erkenntnisse liefert dazu das Projekt "emil – Elektromobilität mittels induktiver Ladung", welches rein elektrisch betriebene Busse in den Braunschweiger Fahrgastbetrieb integriert. In dessen Kontext werden vier Busse auf der 12 Kilometer langen Linie M19 eingesetzt, die ausschließlich per induktiver Schnellladung betrieben werden. So kann der Elektrobus mit 200 kW innerhalb weniger Sekunden berührungsfrei geladen werden, sodass der Fahrgast sowie der Betrieb nicht beeinflusst werden. Das gravierende Problem des induktiven Ladens bis dato besteht jedoch in den hohen Kosten. Der Einsatz induktiven Ladens wird erst dann zu einer realistischen Option werden, wenn es gelingt, die damit verbundenen Kosten stark zu reduzieren. Aus einer technischen Perspektive beweist dieses Projekt, dass induktives

²⁷ BSAG. 2015. E-Mobilität: Auch der Bus-Fuhrpark setzt auf Nachhaltigkeit [http://www.bsag.de/de/projekte/mobil-fuer-morgen/elektromobilitaet.html]

Laden umsetzbar ist und große Vorteile mit sich bringt. Aus einer wirtschaftlichen Perspektive bilden jedoch Ladesäulen die attraktivste Lösung. Sofern diese wie bisher geplant lediglich im Betriebshof installiert werden, wird nur ein Bruchteil der Flotte auf Elektrobusse umgerüstet werden können, da die bisherige Reichweite der Batterien besonders für die Gelenkbusse noch nicht ausreicht. Hiermit verbunden müssen auch Batterien mit hoher Kapazität und hohen Anschaffungskosten (zu erreichende Mindeststrecke laut BSAG: 300 km) beschafft werden, da die Buse tagsüber nicht nachgeladen werden können. Dies stellt zugleich die Problematik der Anforderungen an die Transport- bzw. Mobilitätsleistungen im Fall der BSAG dar. Denn bei den derzeitigen Planungen zur Infrastruktur können die Anforderungen an die Mobilitätsleistungen nicht erfüllt werden. Im Szenario der komplett erfüllten Anforderungen an die Mobilitätsleistungen mit EVs müsste die Planung zur Ladeinfrastruktur ausgeweitet werden. Die Vereinbarung der letzten beiden genannten Erfolgskriterien verkörpert für die BSAG das größte Hindernis für die wirtschaftlich lohnende und vollständige Einführung von EVs. Aus diesem Grund muss die Übertragbarkeit der Wirtschaftlichkeitsfaktoren des BESIC-Vorhabens auf die BSAG in Frage gestellt werden.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass durch die Bemühungen der BSAG bewiesen wurde, dass der Einsatz von EM im Busnahverkehr generell vorstellbar ist. Aus Sicht der organisationalen Erfolgskriterien stellt die BSAG ein attraktives Ziel für die Übertragung der Forschungsergebnisse aus dem BESIC-Projekt, allerdings werfen die technischen und ökonomischen Zweifel zum gegenwärtigen Zeitpunkt ein anderes Licht auf den Sachverhalt. Aus technischer Sicht sind Lösungen (induktives Laden) verfügbar, die eine breite Einführung von Elektrobussen ermöglichen würden, jedoch sind diese nicht vereinbar mit dem ökonomisch gesetzten Maßstab, dass sich keine höheren Kosten durch die EM ergeben sollen. Zugleich behindern kostengünstigere Lösungen (z.B.: Netz aus Ladesäulen) die Logistikprämisse, dass der eigentliche Sinn und Zweck des Busbetriebes nicht beeinflusst werden soll. Eine partielle Einführung erscheint daher als sinnvoll. Für eine vollständige Umrüstung auf Elektrobusse wäre eine fortgeschrittene, technische Entwicklung von Nöten, um diese wirtschaftlich rechtfertigen zu können.

4.5.3.4 Zusammenfassung der Fallstudien

In den nachfolgenden Abbildungen werden die vier vorgestellten Anwendungsgebiete – Containerterminal, Vorfeldbereich Flughafen, Großlagerlogistik und Busnahverkehr – auf deren Eignung für die Nutzung von EM bewertet. Dabei werden anhand einer 10-stufigen Skala (0 = gar nicht geeignet; 10 = sehr gut geeignet) die vorgestellten Erfolgsfaktoren (organisational, technisch und ökonomisch) für das jeweilige Einsatzgebiet bewertet.

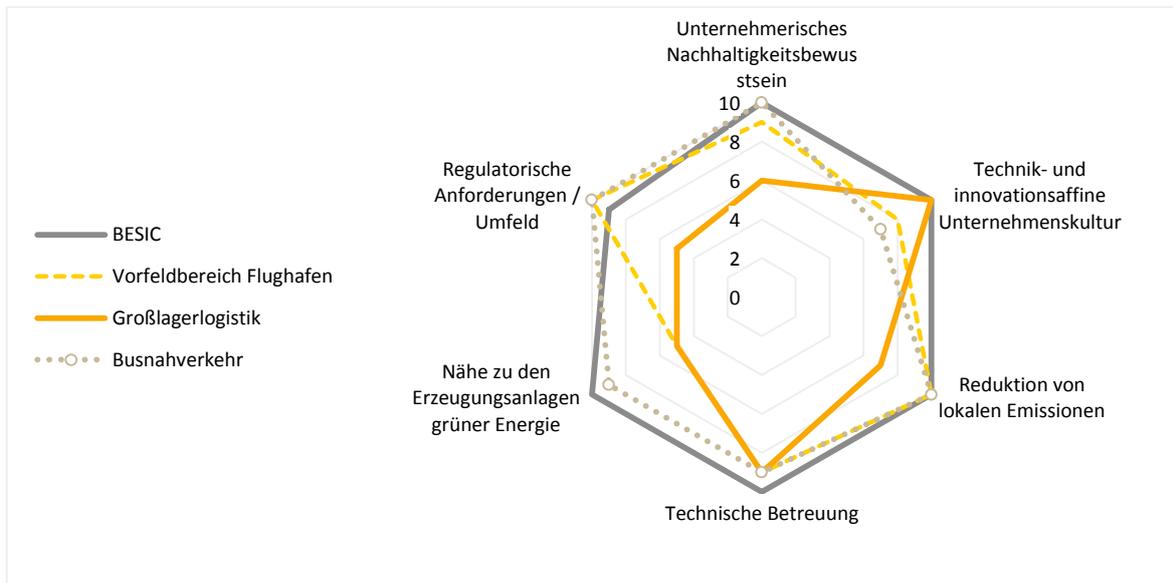


Abbildung 123: Beurteilung der Fallstudien nach organisationalen Kriterien.

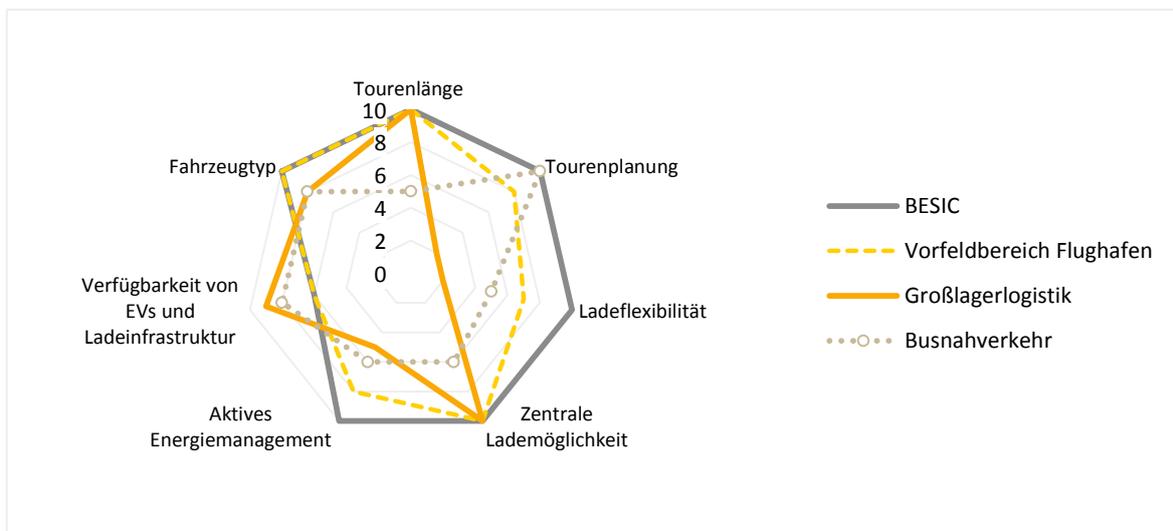


Abbildung 124: Beurteilung der Fallstudien nach technischen Kriterien.

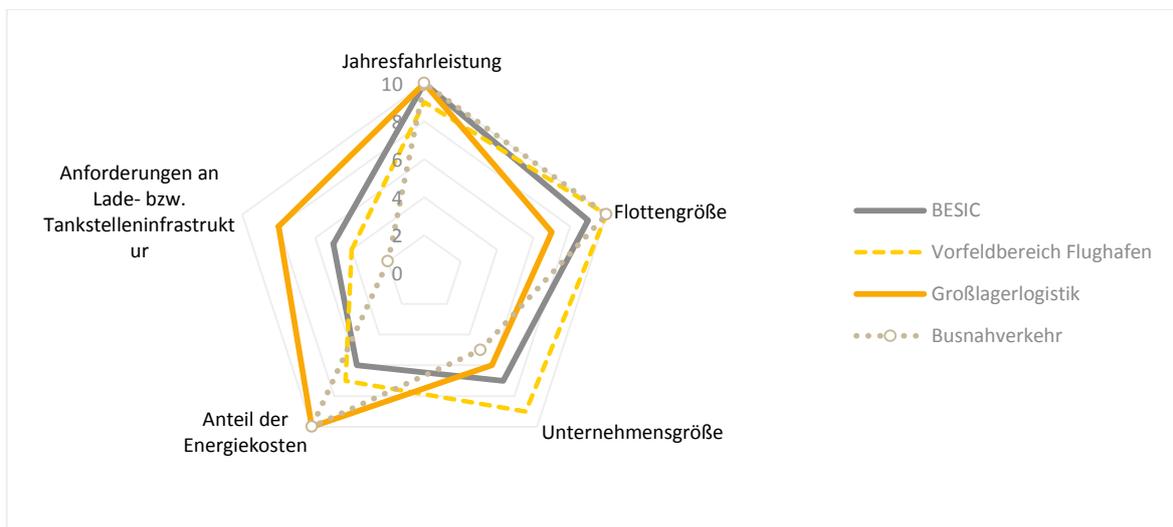


Abbildung 125: Beurteilung der Fallstudien nach ökonomischen Kriterien.

Zusammenfassend kann gezeigt werden, dass die Nutzung von Elektromobilität auf dem **Containerterminal** aufgrund verschiedener Eigenschaften, welche sich sowohl auf die Praktikabilität als auch die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen positiv auswirken, als ideal erscheint. Im Fokus stehen dabei besonders die gute Umsetzbarkeit und das vorhandene ökonomische Potential. Ein ähnliches Bild zeigt sich im **Vorfeldbereich Flughafen**. Aufgrund der großen Ähnlichkeit der Anwendungsgebiete – Containerterminal und Vorfeldbereichs am Flughafen – erscheint der vermehrte Einsatz von Elektromobilität als sinnvoll.

Der Einsatz von Elektromobilität in der **Großhandelslogistik im Versandhandel** ist bedingt sinnvoll. Dies liegt vornehmlich an den geringen unternehmerische Nachhaltigkeits- und Umweltbewusstsein. Weitere ökonomische Analysen sind notwendig, um das wirtschaftliche Potential abschätzen zu können. Aus technischer und organisationaler Sicht kann der Einsatz von Elektromobilität im **öffentlichen Nahverkehr (Bussen)** als optimal angesehen werden. Eine große Schwierigkeit stellt dabei die Bereitstellung einer kostengünstigen Ladeinfrastruktur dar. Daher sind weitere Forschungsvorhaben möglich, um die Marktreife von Bussen im Segment des Wirtschaftsverkehrs sicherstellen zu können.

Abkürzungsverzeichnis

IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
CTA	Container Terminal Altenwerder
AGV	Autonom fahrender Containertransporter (engl. <i>Automated Guided Vehicle</i>)
E-AGV	Containertransporter mit diesel-elektrischem Antriebsstrang (Dieselstromgenerator plus Elektromotoren)
B-AGV	Containertransporter mit batterie-elektrischem Antriebsstrang (Batteriesystem plus Elektromotoren)
ERA	Referenzarchitektur für den Bereich der Elektrizitätswirtschaft (engl. <i>Electricity Market Reference Architecture</i>)
EMS	Energie-Management-System
DRS	Demand-Response-System
BVS	Batterien-Verwaltungs-System
SOC	State-of-Charge (Batterieladezustand)
SOH	State-of-Health (Gesundheitszustand eines Batteriesystems, meint die Maximalkapazität zur entsprechenden Lebenszeit)
TCO	Total Cost of Ownership (Gesamtkostenrechnung)
BMS	Batteriemanagementsystem

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der Schnittstellen von IKT-Systemen rund um das gesteuerte Laden	3
Abbildung 2: Überblick zu energiewirtschaftlichen Handlungsfeldern bei der Nutzung und Vermarktung von Flexibilität der Nachfrageseite	10
Abbildung 3: Prozessmodellierung der Ablaufplanung und Vermarktung	12
Abbildung 4: Prozessmodellierung der Planausführung mit Abrufen von extern.	13
Abbildung 5: Aufbau der Umgebung des Flexible Consumer laut ERA	16
Abbildung 6: Auszug aus dem Architekturentwurf mit neuartigen IKT-Komponenten für die Planung und Steuerung von Elektrofahrzeugen unter energiewirtschaftlichen Aspekten	17
Abbildung 7: Überblick zu den im Simulationsmodell nachempfundenen Funktionsbereichen eines Terminals	24
Abbildung 8: Ausschnitt im Kaiabschnittsbereich mit Abfolge der materialflusstechnischen Stationen	25
Abbildung 9: Ausschnitt eines Modells für den Horizontaltransportbereich mit räumlicher Differenzierung	26
Abbildung 10: Ausschnitt eines Objektmodells für einen Kaikran von einer Containerbrücke	27
Abbildung 11: Schematische Anordnung der Liegeplätze, Ladestation, Fahrspuren u. Wartepositionen	28
Abbildung 12: Schematischer Vergleich von Strategien der Containerbrückenanzuordnung	31
Abbildung 13: Auszug der Datenerfassung der Containerbrücke 2	35
Abbildung 14: Verteilung der Containermassen	38
Abbildung 15: Mitgeschriebene Viertelstundenwerte für Energieverbrauch und Umschlagsleistung	38
Abbildung 16: Liniendiagramm mit dem Simulationsergebnis für einen Referenztag aus 2013	40
Abbildung 17: Balkendiagramm mit durchschnittlichem MAPE für die Simulationsergebnisse	41
Abbildung 18: Balkendiagramm mit maximalem MAPE für die Simulationsergebnisse	41
Abbildung 19: Balkendiagramm mit minimalem MAPE für die Simulationsergebnisse	41
Abbildung 20: Balkendiagramm mit Determinationskoeffizienten für die Simulationsergebnisse	42
Abbildung 21: Sequenzdiagramm über die Ablaufplanerstellung mit Simulationsvorlauf in der Praxis	43
Abbildung 22: Ablauf für die Vorhersage von Transportlast mit Hilfe von Simulation	45
Abbildung 23: Galerie mit den vom 06.10.2015 geplanten Ladezustandsverläufen der Wechselbatterien	46
Abbildung 24: Genereller Aufbau eines Einsatzplans für die Batteriesysteme eines Pools	47
Abbildung 25: Reservierte Ladeleistung für Regelenergieerbringung	50
Abbildung 26: Übersicht der Dekonstruktionsschritte bei Abwägung von Minutenreserveerlösen gegenüber den Kosten des Strombezugs	53
Abbildung 27: Kombination einzelner Varianten der Schnipselgruppen für die Angebotsstücke	54
Abbildung 28: Aufbau Dependenzgraph bzgl. Zerlegung mehrerer Stücke von Minutenreserveangeboten	55
Abbildung 29: Suche von Teilgraphen in einem Dependenzgraphen	57
Abbildung 30: Übersicht der vier Problemlösungsmodule im heuristischen Lösungsverfahren	59
Abbildung 31: Kastendiagramme für die Differenz in den Strombezugskosten (links) und den Erlösen für Minutenreserve (rechts) zwischen den genannten Optimierungsgesichtspunkten	63
Abbildung 32: Balkendiagramm Differenz der Strombezugskosten und der Minutenreserveerlöse über 2013 zwischen den Optimierungsgesichtspunkten „bezugsopt.“ und „kombiniert“	65
Abbildung 33: CAD-Modell eines Containertransporters mit batterie-elektrischem Antriebsstrang (B-AGV)	66
Abbildung 34: Chassis von Containertransportern mit diesel-hydraulischem Antriebsstrang, die auf Stapelholz gelagert worden sind	67
Abbildung 35: Zwei fertig aufgebaute Wechselbatterien	68
Abbildung 36: Anbindung der Batterien an Fahrzeugsteuerung	68

Abbildung 37: Containertransporter mit batterie-elektrischem Antriebsstrang bei Inbetriebnahme auf dem Terminalgelände	69
Abbildung 38: Aufstellskizze Container für Anlagentechnik	70
Abbildung 39: Auszug aus den Stromlaufplänen / Übersicht der Regalfächer in der Station	71
Abbildung 40: Aufbauskiizze von Aufstellcontainern mit Ladegeräteeinheiten; Einblick in d. Aufstellcontainer mit Transformatoreinheit	72
Abbildung 41: angelieferte Ladegerätmodule in Kompaktbauweise	72
Abbildung 42: Erste Erweiterung der Ladeinfrastruktur um die Ladeplätze für Blei-Batteriesysteme	73
Abbildung 43: Aufstellcontainer außerhalb der Leichtbauhalle (beschwert);	73
Abbildung 44: Mobile Radgreiferanlage und Batteriewasserentsalzungsanlage als Werkstattausrüstung für Batteriewartung	74
Abbildung 45: Erstbestückung des Batterielagers mit Wechselbatterien auf Basis von Blei-Batteriesystemen	75
Abbildung 46: Auswertung zur Ausnutzung der Batteriekapazität	76
Abbildung 47: Auswertung Batteriewechsel pro Tag während der Flottenversuche zur regulären Betriebsweise des Containerterminals	77
Abbildung 48: Ladezeiten und Verweildauern der Blei-Säure-Batterien in der BWS	78
Abbildung 49: Strombedarf für den B-AGV-Anteil in den Anfangsmonaten des Feldtests	80
Abbildung 50: Phasen der Einführung des Batterien-Verwaltungs-System (BVS)	82
Abbildung 51: Einsatzzeiten von drei ausgewählten Blei-Säure-Batterien im Fahrzeug zwischen den Batteriewechseln	86
Abbildung 52: Kapazitätsausnutzung bei Blei-Säure-Batterien	87
Abbildung 53: Grafische Ausgabe des Simulators bezüglich der Auswirkungen von Batteriewechselstrategien	88
Abbildung 54: Untersuchung von Batteriewechselstrategien bei Verwendung von Blei-Batteriesystemen mit Simulator	89
Abbildung 55: Untersuchung von Batteriewechselstrategien bei Verwendung von Lithium-Batteriesystemen mit Simulator	90
Abbildung 56: Überblick der Anwendungskomponenten im Teilsystem EXT	92
Abbildung 57: Überblick zu den Subkomponenten der Ablaufplanausführung innerhalb des EMS	95
Abbildung 58: Detailblick für die Informationsschnittstelle zwischen dem EMS und dem Teilsystem EXT	97
Abbildung 59: Schematische Darstellung des Kommunikationsverlaufs für das gesteuerte Laden	98
Abbildung 60: Interaktionsmuster für die Registrierung eines VEN beim VTN („Handshake“)	99
Abbildung 61: Übersicht der bekannt gemachten Berichtsfähigkeiten eines VEN im VTN und den zuletzt übermittelten Berichtsinhalten	100
Abbildung 62: Interaktionsmuster für die Anforderung von Berichtsdaten und deren fortlaufender Versand	101
Abbildung 63: Eingabemaske in der VTN-Komponente für die manuelle Erteilung eines Abrufs zur Erbringung von Regelenergie	102
Abbildung 64: Interaktionsmuster für die Übermittlung von Daten mit Ereignischarakter	102
Abbildung 65: Grafische Benutzungsoberfläche der Kommunikationskomponente (VEN) des EMS-TS2	104
Abbildung 66: Detailblick für die Informationsschnittstelle zwischen dem Teilsystem BVS und dem EMS-TS2	105
Abbildung 67: Bildschirmfoto Benutzungsoberfläche BVS: Regalbelegung mit Schaltvorgängen	106
Abbildung 68: Veranschaulichung des Schaltverhaltens bezüglich des automatisierten Starts eines Ladevorgangs nach Batteriewechsel	106
Abbildung 69: Veranschaulichung des Schaltverhaltens bezüglich der Unterbrechung und der Wiederaufnahme eines Ladevorgangs	107

Abbildung 70: Übersicht über die beteiligten Anwendungskomponenten und deren infrastrukturtechnischen Zugehörigkeit	110
Abbildung 71: Ineinandergreifen der energiewirtschaftlichen Ablaufplanung Tags voraus und der Ausführung eines Ablaufplans an seinem Geltungstag	111
Abbildung 72: Darstellung der Beziehungen der Testdokumente	113
Abbildung 73: Verschiedene Testphasen zur Vorbereitung und Durchführung des Flottenversuchs für gesteuertes Laden	116
Abbildung 74: Verwaltung von Stammdaten der Anlagen im Pool beim Teilsystem EXT	117
Abbildung 75: Aufzeichnungen für das Prüfprotokoll zu Testfall Nummer 19	119
Abbildung 76: Auswertung für den Prüffall Nr. 19 mit unterschiedlichen Berechnungsmethoden für die Bezugswerte	120
Abbildung 77: Vergleich unterschiedlicher Berechnungsmethoden anhand der errechneten MRL-Lieferung	121
Abbildung 78: Aufzeichnungen für das Prüfprotokoll zu Testfall Nummer 24	123
Abbildung 79: Aufzeichnungen für das Prüfprotokoll zu Testfall Nummer 23	124
Abbildung 80: Diagramme mit gruppierten Säulen für die Transporte unter Maximalauslastung (oben) und realistischer Auslastung des Terminals (unten)	127
Abbildung 81: Diagramme für die Wartezeiten unter Maximalauslastung (links) und realistischer Auslastung des Terminals (rechts)	128
Abbildung 82: Oberflächendiagramm für die durchschnittliche Zeit ohne Fahrbereitschaft beim herkömmlichen Automatisierungsansatz	129
Abbildung 83: Oberflächendiagramm für die Gesamtzahl der Transporte beim vorausschauenden Automatisierungsansatz	130
Abbildung 84: Transportverpackung eines Trogs für ein Typ 2-Batteriesystemmodul	133
Abbildung 85: Verlauf der Kenngrößen der Typ 1 Batterie bei einer Ladung mit 80kW	134
Abbildung 86: Verlauf der Kenngrößen der Typ 1 Batterie bei einer Ladung mit 250kW	135
Abbildung 87: Aufnahmen von der Konstruktion des Typ 1-Batteriesystems	136
Abbildung 88: Aufnahmen von der Konstruktion des Typ 2-Batteriesystems	137
Abbildung 89: Aufgebaute Wechselbatterie auf Basis des Typ 1-Batteriesystems	138
Abbildung 90: Aufgebaute Wechselbatterie auf Basis des Typ 2-Batteriesystems	138
Abbildung 91: Aufstellcontainer mit Ladegeräteeinheit für Lithium-Batteriesysteme am Werksstandort und Verteilerschrank mit Steckvorrichtung Automatikbetrieb/Handladebetrieb	139
Abbildung 92: AGV-87 mit Testgewicht auf dem Testfeld von TEREX in Düsseldorf	140
Abbildung 93: Referenzzyklus Testfeld	141
Abbildung 94: Versuchsergebnisse AGV-87 mit Blei-Batteriesystem	141
Abbildung 95: Versuchsergebnisse AGV-87 mit Blei-Batteriesystem sowie Typ 1-Batteriesystem, Vergleich Strom und Spannung	142
Abbildung 96: Energieaufnahme bei Messfahrten ohne Zuladung	143
Abbildung 97: Erweiterung der Batteriewechselstation (BWS) um eine Ladegeräteeinheit für die Lithium-Batteriesysteme	144
Abbildung 98: Steuerungen der Ladegeräteeinheit für die Lithium-Batteriesysteme	145
Abbildung 99: Ausschnitt aus einer Tabelle mit Testprozeduren und Signalverläufen	145
Abbildung 100: Fahrprofil vom 31.03.2016 mit Verwendung des Typ 1-Batteriesystems	147
Abbildung 101: Ladung Modul Typ 1 ohne Kühlung bei C/2	149
Abbildung 102: Ladung Modul Typ 1 mit aktiver Kühlung bei Ladung mit $\frac{1}{2}$ C	149

Abbildung 103: Ladung Modul Typ 2 bei Ladung mit $\frac{1}{3}$ C	150
Abbildung 104: erstes Testprofil für Modultests zur Degradationsuntersuchung	150
Abbildung 105: Restkapazität Modul Typ 1 bei 50 % Entladetiefe und Ladung mit $\frac{1}{2}$ C	152
Abbildung 106: Restkapazität Modul Typ 1 bei 80 % Entladetiefe und Ladung mit $\frac{1}{3}$ C	152
Abbildung 107: Restkapazität Modul Typ 2 (Modul 2) bei 50 % Entladetiefe und C/3 Ladung	153
Abbildung 108: Lebensdauermatrix	154
Abbildung 109: Zyklenlebensdauer über Amperestundendurchsatz Batteriesystem Typ 1	155
Abbildung 110: verschiedene Modellvarianten [KeJos]	156
Abbildung 111: Ruhespannungsverlauf (U_0) Modul Typ 1 bei 25 °C	157
Abbildung 112: Impedanzspektrum Modul Typ 2	158
Abbildung 113: Übersicht Modellstruktur	158
Abbildung 114: Prognostizierte Entwicklung der Energiepreise (Öl und Strom) bis 2040.	160
Abbildung 115: Entwicklung der jährlichen Strombezugskosten für die Ladung der Batterien je Szenario.	161
Abbildung 116: Illustration optimierende Planung von Strombezugskosten Ladung einer Wechselbatterie.	162
Abbildung 117: Verlauf der jährlichen Kosten von 2012-2027 Ungesteuertes Laden / 2:1 Ausstattung	163
Abbildung 118: Verlauf der jährlichen Kosten von 2012-2027 Gesteuertes Laden / 2:1 Ausstattung	164
Abbildung 119: Verlauf der jährlichen Kosten von 2012-2027 Ungesteuertes Laden / Minimalausstattung	165
Abbildung 120: Verlauf der jährlichen Kosten von 2012-2027 für die E-AGV-Flotte und B-AGV-Flotte in allen für alle Szenarios.	165
Abbildung 121: Ergebnis der TCO-Analyse beim Flottenanteilsszenario „Vollausstattung“	170
Abbildung 122: Ergebnis der TCO-Analyse beim Flottenanteilsszenario „Mischbetrieb 1“	170
Abbildung 123: Beurteilung der Fallstudien nach organisationalen Kriterien.	182
Abbildung 124: Beurteilung der Fallstudien nach technischen Kriterien.	182
Abbildung 125: Beurteilung der Fallstudien nach ökonomischen Kriterien.	182

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vorlage zur Beschreibung der Prozessschritte aus der Modellierung mit BPNM.....	14
Tabelle 2: Überblick über Eigenschaften der einzelnen Datenformate	20
Tabelle 3: Bewertung von Kommunikationsstandards bezüglich der Erfüllung der einzelnen Anforderung des BESIC-Projekts.....	22
Tabelle 4: Übersicht der logistischen Problemstellungen im CTA und deren operativer Bearbeitung	29
Tabelle 5: Übersicht der zu verwendenden Methoden zur Bestimmung von Umschlagszeiten und Leistungsaufnahmen in den verschiedenen Bereichen der Logistiksimulation.....	36
Tabelle 6: Prioritäten- und Zuordnungsregeln für die Grobplanung der Einsatzaktivitäten von Wechselbatterien und Fahrzeugen	48
Tabelle 7: Neuordnungsregel für die Feinplanung der Ladeverläufe bei den Stationsaufhalten der Wechselbatterien.....	51
Tabelle 8: Gesamtübersicht Planungsergebnisse im Ganzjahresvergleich verschiedener Optimierungsgesichtspunkte	62
Tabelle 9: Kennzahlen aus Flottenversuchen zur regulären Betriebsweise des Containerterminals.....	79
Tabelle 10: Auszug aus der Testfallübersicht für die Ablaufplanungs- und Vermarktung	114
Tabelle 11: Auszug aus der Testfallübersicht für die Planausführung	115
Tabelle 12: Testfälle für die Abnahmeprozedur und erste Inbetriebnahmen der Lithium-Batteriesysteme	134
Tabelle 13: Testprogramm für die Vorinbetriebnahme eines Containertransporters in Düsseldorf	140
Tabelle 14: Einflussgrößen auf die Degradation und deren Wirkung.....	155
Tabelle 15: Gesamtkosten beider Flotten in allen Ausstattungs- und Betriebsszenarios sowie unterschiedlicher Energiepreisszenarien.....	166
Tabelle 16: Überblick zu den analysierten Flottenanteilen der B-AGV und den gegenübergestellten E-AGV als jeweilige Investitionsalternative	168
Tabelle 17: Lade- bzw. Tankstelleninfrastruktur in den jeweils angedachten Flottenanteilen der B-AGV und gegenübergestellten Flotten von E-AGV.....	169
Tabelle 18: Erfolgsfaktoren für eine Verbreitung von Elektromobilität in verwandten Einsatzgebieten.	171