

Abschlussbericht zum Vorhaben

**Forschung und Entwicklung batteriebetriebener Schwerlastfahrzeuge (AGV)  
und deren Erprobung in einem Feldversuch im Container-Terminal  
Altenwerder in Hamburg**

im Rahmen des FuE-Programms  
**"Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität"**

Düsseldorf, Oktober 2011

Kurztitel:

B-AGV

Projektpartner:

Gottwald Port Technology GmbH, Düsseldorf

HHLA Container-Terminal Altenwerder GmbH, Hamburg

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH

RWTH Aachen - Institut für Kraftfahrzeuge

Projektlaufzeit:

01.06.2010 – 30.09.2011

Gefördert durch das:



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit



Erneuerbar  
mobil

**FuE-Programm "Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität" des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)**

**Gemeinsamer Abschlussbericht**

**Forschung und Entwicklung batteriebetriebener Schwerlastfahrzeuge (AGV) und Erprobung in einem Feldversuch im Container-Terminal Altenwerder in Hamburg – B-AGV**

Laufzeit des Vorhabens:

vom: 01.06.2010

bis: 30.09.2011

Zuwendungsempfänger:

*(Auflistung aller Verbundpartner)*

Gottwald Port Technology GmbH, Düsseldorf (GPT)

HHLA Container-Terminal Altenwerder GmbH, Hamburg (CTA)

RWTH Aachen – Institut für Kraftfahrzeuge Aachen (ika)

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu)

Förderkennzeichen:

*(FKZ's entsprechend der links angegebenen Verbundpartner)*

FKZ 16EM0078

FKZ 16EM0079

FKZ 16EM0080

FKZ 16EM0081

**INHALTSVERZEICHNIS**

1	Executive summary .....	1
2	Zielstellung des Verbundprojekts.....	2
2.1	Gesamtziel des Vorhabens.....	2
2.2	Aufgaben einzelner Partner .....	4
3	Ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse des Verbundprojekts .....	6
3.1	APG 1: Batterie-elektrische Versuchsfahrzeuge (B-AGV).....	7
3.2	APG 2: Batterielade- und Wechselstation .....	19
3.3	APG 3: Ladestrategien – Gesteuertes Laden.....	31
3.4	APG 4: Langzeittest.....	35
3.5	APG 5: Simulation des batterie-elektrischen Antriebsstrangs und Auslegung der SuperCaps .....	63
3.6	APG 6: Alternative Batteriesysteme .....	74
3.7	APG 7: Ökologische Begleitforschung.....	78
3.8	APG 8:Organisation und sonstige Begleitforschung.....	117
4	Darstellung wesentlicher Abweichungen vom Arbeitsplan .....	119
5	Vergleich der Projektergebnisse zum internationalen Stand der Technik .....	120
6	Zukunftsaussichten und weiterer F&E-Bedarf .....	121
7	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) .....	123

## 1 EXECUTIVE SUMMARY

The container transport via seaports is essential for the global industry. In order to handle the yearly throughput of several hundred millions of containers, the ports do not just need cranes to (un-)load the ships and serve the storage area (stack) but also numerous transport vehicles for hauling containers inside the terminals. Depending on the throughput strategy, different vehicle concepts like straddle carriers, reach stackers, terminal trucks or Automated Guided Vehicles (AGV) are used.

Other than the mostly electrically driven cranes, these heavy-duty vehicles have in common that they are diesel-powered and thus require large amounts of fossil fuel to operate. For this reason they are responsible for many negative environmental impacts. The high local traffic densities (frequently more than 100 heavy-duty vehicles operate on one single terminal) lead to high exhaust emission concentrations and to high noise exposures. This has a negative impact on the working conditions and pollutes the surrounding environment.

In order to reduce these drawbacks a cooperative research project was carried out by the Gottwald Port Technology GmbH, the HHLA Container-Terminal Altenwerder GmbH, Hamburg, the Institut für Kraftfahrzeuge Aachen of the RWTH Aachen and the ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.

The main aim of the project was by developing a zero-emission vehicle that can operate with eco-friendly, renewable electrical energy. As a result, a battery-powered drive train was designed, which has been applied in two new battery driven AGV prototypes (Battery-AGV) for automated container transport. In addition, the prototype of a fully automated battery change station was designed and assembled. The Battery-AGV prototypes and the battery change station have been tested for several months on the CTA container terminal.

As part of the project, a complex simulation model of the battery electric drive train was built up for facilitating the design work, finding optimization potentials for energy savings and calculating the performance characteristics for future applications.

Within the testing period it could be shown that the new technology works reliable and has good performance characteristics. The total efficiency of the vehicle drive train could be improved significantly allowing a reduction of emissions and energy costs. The Battery-AGV can operate more than 12 hours with a charged battery even under peak conditions. The battery can be exchanged automatically in less than 5 minutes so the over-all performance of the Battery-AGV system is equivalent to a diesel-driven system.

The electrical operation of the vehicles completely avoids local air pollution while significantly reducing the noise exposure. In addition to these obvious advantages, a detailed ecological evaluation of the Battery-AGV system has shown that the new technology has significant over-all ecological advantages. The use of renewable energy sources will further improve the ecological advantages.

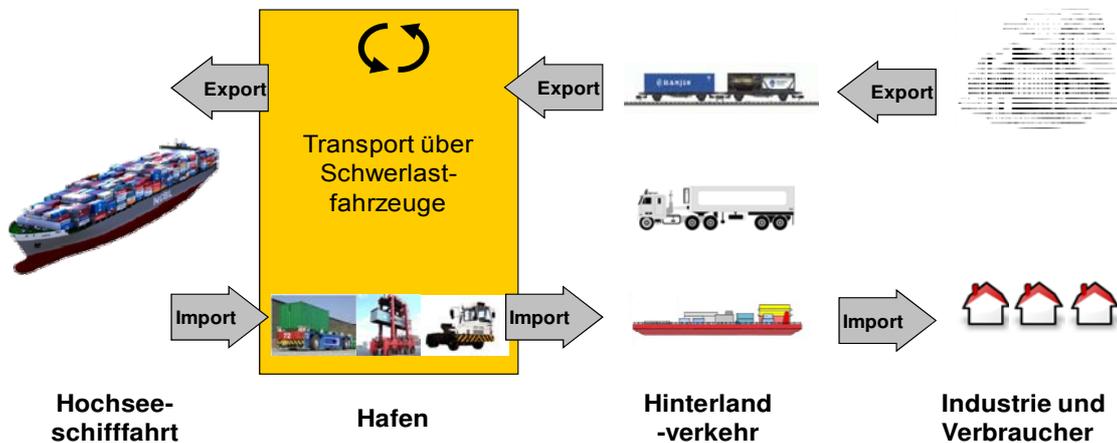
## 2 ZIELSTELLUNG DES VERBUNDPROJEKTS

### 2.1 Gesamtziel des Vorhabens

Der Wirtschaftsverkehr ist ein unverzichtbarer Motor für den globalen Handel und zugleich Ursache zahlreicher Umweltbelastungen. Der jährliche weltweite Containerumschlag betrug in 2008 ca. 489 Mio. TEU<sup>1</sup>. Über deutsche Seehäfen wurden in 2007 rund 15,3 Mio. TEU, davon 9,9 Mio. TEU alleine im Hafen Hamburg umgeschlagen.

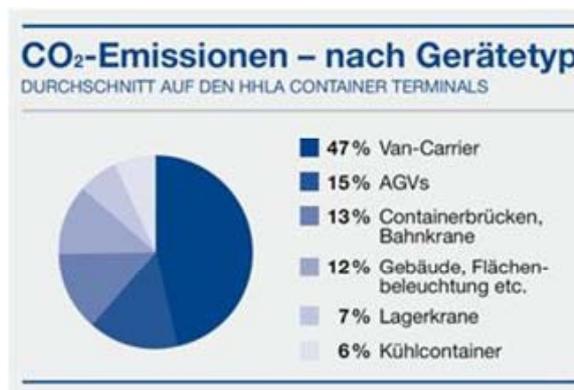
Für die Exportnation Deutschland mit einem Exportvolumen von 992 Milliarden Euro (2008) ist der Export und damit der Zugang zu internationalen Märkten von entscheidender Bedeutung. Der Zugang wird insbesondere über Seehäfen sichergestellt.

Jeder Container muss innerhalb der Häfen über Schwerlastfahrzeuge transportiert werden. Zur Sicherstellung der globalen Mobilität sind Schwerlastfahrzeuge ein unverzichtbarer Bestandteil des Warentransports. Dies wird in der folgenden Abbildung illustriert. Der Transport über Schwerlastfahrzeuge im Hafen ist ein wichtiger Teil des Wirtschaftsverkehrs und Grundlage der globalen Mobilität.



**Abbildung 1:** Schwerlastfahrzeuge im Wirtschaftsverkehr

Der jährliche Warenumsatz in den fünf größten deutschen Seehäfen beträgt rund 300 Millionen Tonnen (2007). Studien gehen davon aus, dass der jährliche Containerumschlag sich in den deutschen Nordseehäfen bis 2025 annähernd verdreifachen wird.



**Abb. 2:** CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der HHLA

**Abbildung 2:** CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der HHLA

<sup>1</sup> \*1 TEU = 20' Container

Um diesen Umschlag innerhalb der Häfen logistisch zu bewältigen, werden nicht nur Krananlagen zum Be- und Entladen sondern auch Containertransportfahrzeuge zum Warenverkehr innerhalb des Hafens benötigt. Bei der HHLA im Hamburger Hafen sind diese Schwerlastträger für einen Großteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Von den insgesamt 90.000 t CO<sub>2</sub>, die die Containerterminals der HHLA in 2008 emittierten, entfallen allein gut 15 % auf Treibstoffverbrennung durch Automated Guided Vehicles (AGV) und 47 % auf Van-Carrier. In Summe werden durch die beiden Schwerlastfahrzeuge also jährlich 55.800 t CO<sub>2</sub> emittiert.

Mit dem vorgestellten Vorhaben sollen die folgenden Ziele erreicht werden:

- Deutliche Steigerung der Energieeffizienz von Schwerlastfahrzeugen: Hoher Gesamtwirkungsgrad des batterie-elektrischen Antriebstrangs von voraussichtlich 56 %
- Vermeidung von Verlusten während der häufigen Stillstandzeiten der Fahrzeuge (kein Verbrauch beim Stillstand durch Batterietechnik, im Gegensatz zum Leerlauf des Dieselmotors)
- Vollständige Reduktion der Abgase und auch der lokalen CO<sub>2</sub>-Emission der AGVs
- Deutliche Reduzierung der durch die Fahrzeuge verursachten globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen (mind. 30 % Reduzierung über die gesamte Energiekette)
- Deutliche Reduzierung der lokalen Geräuschemissionen: Lärmquellen beschränken sich auf Abrollgeräusche, die Umrichter und Elektromotoren sowie das Hydraulikaggregat.

Erreicht werden sollen diese Ziele zunächst durch Erforschung und Entwicklung eines batterie-elektrischen Antriebsstrangs für Schwerlastfahrzeuge im Wirtschaftsverkehr mit Batteriewechselkonzept. Anschließend erfolgen der Aufbau und die Erprobung einer Flotte von batterie-elektrischen Containertransportern in einem Feldversuch im Hamburger Hafen inklusive einem automatisierten Batteriewechsel. Innerhalb des Projekts sollen konventionelle Bleibatterien eingesetzt werden, deren Größenordnung derzeitige Anwendungen jedoch deutlich übersteigen.

Begleitend zum Aufbau und zur Erprobung werden durch die Beteiligung des ika Forschung und Entwicklung im Bereich der SuperCaps, die als zusätzliche kurzzeitige Energiespeicher eingesetzt werden sollen, durchgeführt. Zudem werden die Partner Gottwald und ika sich intensiv mit der Fragestellung alternativer Batterietypen befassen. Bereits innerhalb des Projektes soll der Antriebsstrang so ausgelegt werden, dass das System unabhängig von der eingesetzten Energiequelle ist. Somit wird auch zukünftig der Einsatz von Lithium-Ionen Batterien möglich sein.

Nach erfolgreicher Durchführung des Projekts soll eine schnelle und wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse durch die Zusammenarbeit der beiden industriellen Partner Gottwald und CTA erfolgen. Die Umrüstung der AGV-Flotte bei CTA ermöglicht bereits eine jährliche Vermeidung von ca. 6.100 t CO<sub>2</sub>. Die Umrüstung aller Schwerlastfahrzeuge ermöglicht eine jährliche Vermeidung von ca. 25.100 t CO<sub>2</sub> bei HHLA<sup>2</sup>, wobei ein geschätztes Einsparpotenzial bei einem Van-Carrier von 45 % angenommen wird. Die Einsparungen steigen bei einer Zunahme von Strom aus alternativen Energien weiter an.

Über den Hafenbetrieb hinaus bietet ein erfolgreiches Projekt einen großen Multiplikatoreffekt mit entsprechend hohem Einsparpotenzial an CO<sub>2</sub>-Emissionen: Das diesel-elektrische Antriebskonzept der derzeitigen AGV wird in ähnlicher Form auch bei weiteren Schwerlastfahrzeugen eingesetzt. Beispiele hierfür sind Muldenkipper, Gabelstapler, Busse, Straddle Carrier oder Flugzeugschlepper. Die zu erwartenden Erkenntnisse dieses Projektes bezüglich Fahrverhalten, Reichweite, Batterielebensdauer

---

<sup>2</sup> bei durchschnittlichem Strommix in Deutschland: rd. 600 g CO<sub>2</sub> pro kWh

und Einflüsse von Umweltbedingungen sind entscheidende Voraussetzungen für einen breiten Serieneinsatz des batterie-elektrischen Antriebs und ermöglichen die Umstellung anderer Fahrzeugtypen von diesel-elektrischen auf batterie-elektrischen Antrieb.

Folgende Arbeitsziele werden während des vorgestellten Vorhabens angegangen:

- Forschung und Entwicklung eines batterie-elektrischen Schwerlastfahrzeugs (AGV) und einer Batteriewechsel und -ladestation inklusive Aufbau und Inbetriebnahme
- Entwicklung einer flexiblen Ladestrategie unter maximaler Ausnutzung erneuerbarer Energien
- Langzeittest des batterie-elektrischen Antriebsstrangs im Feldversuch unter Alltagsbedingungen, daraus Ableitung von Auslegungskennzahlen
- Aufsetzen eines Simulationsmodells des Antriebsstrangs mit SuperCaps
- Validierung des Modells mit Hilfe der Messergebnisse aus dem Feldversuch
- Integration der SuperCaps in den Antriebsstrang
- Forschung und Untersuchung zum Einsatz alternativer Batterien
- Begleitforschung zur ökologischen Gesamtbewertung und zum Mobilitätsverhalten

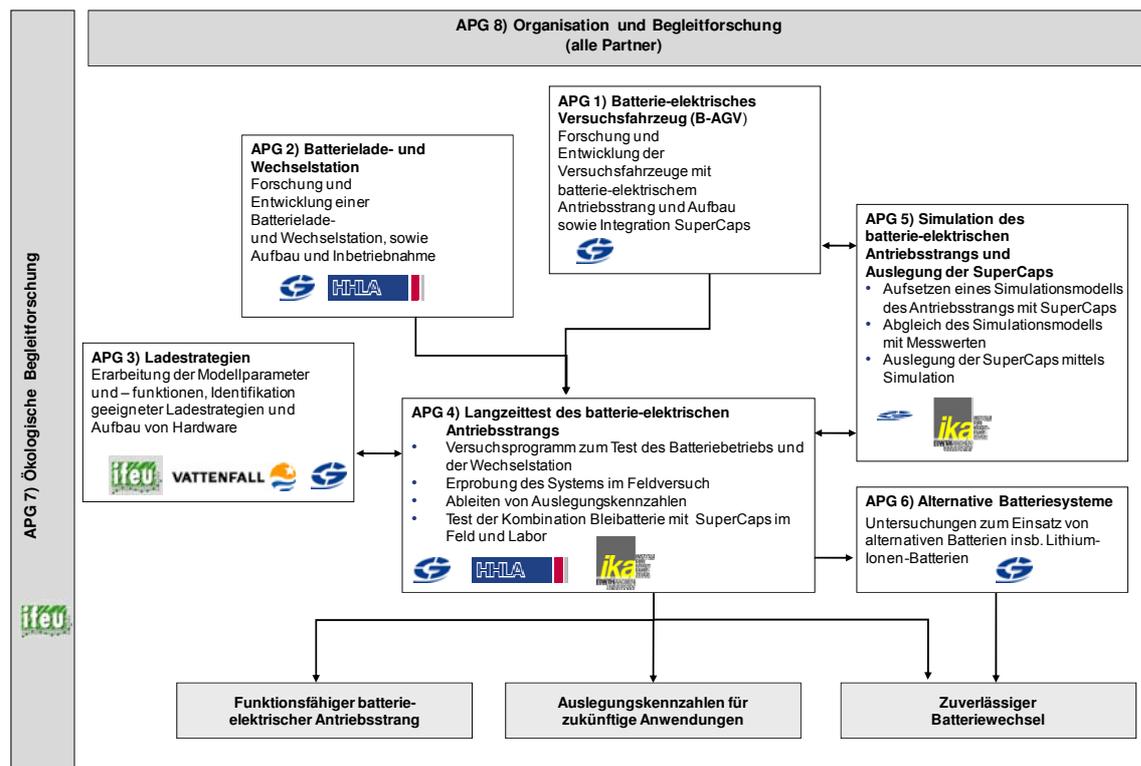


Abbildung 3: Übersicht der Arbeitsziele

## 2.2 Aufgaben einzelner Partner

Das vorgestellte Vorhaben ist ein Verbundprojekt zwischen den vier Partnern Gottwald, CTA, ika und ifeu. Damit arbeiten führende Vertreter aus den Bereichen Fahrzeugentwicklung und Systemanbieter (GPT), Anwender im Wirtschaftsverkehr (CTA) und Kraftfahrzeugforschung (ika) sowie Energie -und Umweltforschung (ifeu) zusammen. Die enge Zusammenarbeit der Partner konnte durch ein striktes Projektmanagement durch den koordinierenden Projektpartner Gottwald sichergestellt werden. Die Projektpartner haben mit ihren

ergänzenden Kompetenzen den Projekterfolg innerhalb der angesetzten Projektlaufzeit sicherstellen können.

Gottwald hat als Projektkoordinator an fast allen Arbeitspaketgruppen innerhalb des Projektes mitgearbeitet. Der Schwerpunkt von Gottwald lag insbesondere in der Forschung und Entwicklung sowie dem Aufbau des Gesamtsystems bestehend aus den Fahrzeugen, der Batteriewechsel- und -ladestation sowie deren steuerungstechnische Verknüpfung. Weiterhin hat Gottwald Untersuchungen zum Einsatz alternativer Batterien insbesondere Lithium-Ionen Batterien durchführen können und in Abstimmung mit Batterieherstellern eine technische Bewertung über die Einsatzfähigkeit und die erforderlichen Entwicklungsaktivitäten bis zu einem Serieneinsatz angefertigt.

Seitens CTA wurden die Bereiche der baulichen Errichtung der Batteriewechselstations-Einhausung sowie die Fundamentierungen für die AGV-Fahrfläche und das Schwerlast-Regalsystems verantwortet. Ferner war CTA für alle infrastrukturellen Maßnahmen wie z.B. die Stromversorgungs- und Netzwerk-Bereitstellung verantwortlich, sowie für die konzeptionelle und bauliche Erweiterung der „Zutrittskontrolle Automatikbereich“ (ZKA), einer Tor- und Schrankenanlage, die den sicheren Zutritt zur Batteriewechselstation im Wartungsfalle gewährleistet. Konzeptionelle Mitarbeit wurde hinsichtlich der softwaretechnischen Ansteuerung der von Fa. Gottwald zu liefernden Automatiksysteme im Hinblick auf die Anbindung an das Terminal-Operating-System (TOS) geleistet. Insbesondere Schnittstellenbeschreibungen wurden erarbeitet und weitreichende Softwaretests vor und während der Inbetriebnahmen durchgeführt. Auch waren EDV-technische Änderungen am TOS selbst notwendig und wurden vom HHLA Zentralbereich Informationssysteme umgesetzt. Vor Durchführung des Langzeittests vor Ort im Container-Terminal Altenwerder in Hamburg wurden zur betrieblichen Integration zudem umfangreiche Schulungen aller prozessbeteiligten CTA-Mitarbeiter durchgeführt. Während des Langzeittests stellte CTA über sein Tochterunternehmen SCA die permanente Verfügbarkeit von Entstörpersonal sicher. Zudem wurden technische Möglichkeiten für die Erstellung von wesentlichen Kennzahlen geschaffen und diese testbegleitend ausgewertet.

Das ifu ist eines der führenden Hochschulinstitute im Bereich Elektromobilität. Die Beteiligung des Instituts stellt sicher, dass die erforderliche Expertise im Bereich Simulation und Auslegung von SuperCaps vorhanden ist. Zudem ist das Institut zuständig für die Entwicklung der generellen Betriebsstrategie des hybriden elektrischen Energiespeichers im Simulationsmodell und führt entsprechende Prüfstandtests der Energiespeicher zur Untersuchung des Einflusses der Lastprofile auf Batteriekapazität und Lebensdauer durch.

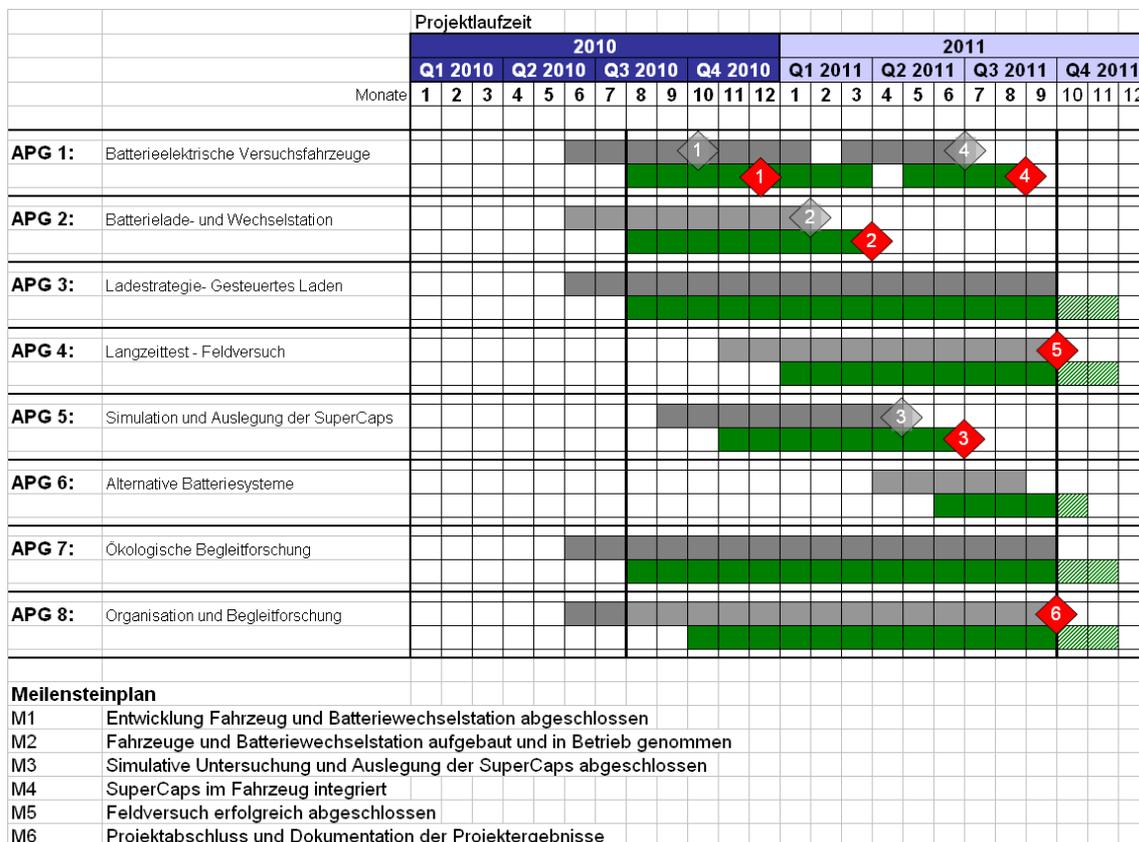
Schwerpunkte der Arbeiten des ifu sind u.a. die Bilanzierung der Emissionen des Gesamtverkehrs in Deutschland (TREMODO), die Bewertung von Minderungsmaßnahmen (Klimagase, Immissionen) und die ökobilanzielle Erfassung von Elektrofahrzeugen. Im vorgestellten Vorhaben wird das ifu insbesondere die Ökologische Begleitforschung: Vergleich der Umweltwirkung der Elektro-AGVs mit Blei- und Lithium-Ionen-Batterie untereinander und mit konventionell dieselbetriebenen AGV durchführen.

Im Projekt wird außerdem das Energieversorgungsunternehmen Vattenfall in Form eines Unterauftrages eingebunden. Neben dem gesteuerten Laden mit regenerativen Energien wird Vattenfall auch ein Grünstrom Produkt anbieten.

### 3 AUSFÜHRLICHE DARSTELLUNG DER ERZIELTEN ERGEBNISSE DES VERBUNDPROJEKTS

Die Aufgabenstellung des Vorhabens ist in acht Arbeitspaketgruppen (APG) gegliedert, wobei in der APG 8 die Arbeiten zur Organisation und Begleitforschung zusammengefasst sind. Die einzelnen APG sind wiederum in Arbeitspakete untergliedert, die durch einen oder mehrere Projektpartner bearbeitet werden können, siehe **Abbildung 3**. Der Zeitplan der Vorhabensbeschreibung wurde aufgrund der verspäteten Bewilligung vom 13.08.2011 entsprechend der unten stehenden Grafik angepasst. Das Ende des Vorhabens wurde bei behalten, so dass die Laufzeit des Projekts auf 13 Monate verkürzt wurde. Die grau dargestellten Balken bilden den ursprünglichen Zeitplan ab, die grünen Balken den mit verschobenen Beginn.

Alle Arbeitspakete konnten gemäß der Vorhabensbeschreibung fristgerecht bearbeitet und abgeschlossen werden, mit Ausnahme der Integration und Erprobung des Kurzzeit-Energiespeichers. Einige der hiermit verbundenen Arbeiten wurden aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse nach Rücksprache mit dem Projektträger gekürzt bzw. gestrichen.



**Abbildung 4:** Angepasster Zeitplan

Im nachfolgenden Kapitel werden die innerhalb des Verbundprojekts erzielten Ergebnisse detailliert dargestellt. Der für das jeweilige Arbeitspaket (AP) verantwortliche Projektpartner wird in der Überschrift erwähnt. Bei den AP, die gemeinsam durch mehrere Projektpartner bearbeitet wurden, werden die jeweiligen Ergebnisse den Partner im Text zugeordnet.

### 3.1 APG 1: Batterie-elektrische Versuchsfahrzeuge (B-AGV)

Innerhalb der Arbeitspaketgruppe 1 werden alle Arbeiten zusammengefasst, die für den Aufbau der beiden batterie-elektrischen Versuchsfahrzeuge erforderlich gewesen sind. Die Arbeiten erstrecken sich über die Festlegung des Fahrzeugkonzepts, die Auslegung und Auswahl der neu eingesetzten Komponenten, die Konstruktion über die Fertigung und Montage bis hin zur Inbetriebnahme der Fahrzeuge.

Der Großteil der Arbeiten wurde durch GPT erbracht mit Unterstützung des Betreibers CTA. Neben den technischen Abteilungen entfiel ein sehr großer Anteil der eingesetzten Personalstunden auf die Fertigung von GPT.

Die größte Einzelkostenposition für CTA entfällt auf die Arbeitspaketgruppe 1. Im Rahmen dieser Arbeitspaketgruppe wurden von CTA zwei Batterie-AGV und vier Traktionsbatterien beschafft, bzw. in diesem Fall wurde GPT mit der Umrüstung von zwei diesel-elektrischen AGV aus dem Bestand von CTA auf batterie-elektrischen Antrieb beauftragt. Die hierzu von den Projektpartnern eingebrachten Leistungen sind im Folgenden in den hier untergliederten Arbeitspaketen beschrieben. Ursprünglich war auch die Beschaffung eines sogenannten UltraCaps durch CTA vorgesehen, der durch GPT in eines der Fahrzeuge integriert werden sollte. Dies ist jedoch in Absprache mit dem Projektträger mangels Erfolgsaussichten unterblieben (siehe AP 1.7). Außer der Abwicklung des Erwerbs besagter Komponenten hat CTA im Rahmen der APG 1 nur in AP 1.5 direkt mitgewirkt - dies ist dort beschrieben.

#### AP 1.1: Auslegung Fahrzeug (GPT)

Die vorgestellten AGV haben die Aufgabe, innerhalb des Container-Terminals standardisierte Container vollautomatisiert von den Kaikranen zum Lager und zurück zu transportieren. Diese Aufgabe kann nicht von einem Fahrzeug allein sondern nur von einer gesamten Fahrzeugflotte bewerkstelligt werden. Damit die Steuerung der gesamten Fahrzeugflotte reibungslos funktioniert, ist es von großer Bedeutung, dass alle Fahrzeuge die gleichen Abmessungen und Fahrleistungen aufweisen.

Aus diesem Grund sind die grundlegenden technischen Daten für die Auslegung der beiden geplanten batterie-elektrischen AGV (Batterie-AGV) die gleichen wie die für die vorhandenen, mit einem Dieselmotor betriebenen Fahrzeuge. Die wichtigsten technischen Daten sind der anschließenden Tabelle dargestellt.

**Tabelle 1:** Technische Daten AGV

Länge	14,8 m
Breite	3,0 m
Höhe	1,7 m
Containerbeladung	1 x 20'-, 1 x 40'-, 1 x 45', 2 x 20'-Container
Nutzlast	60.000 kg
Geschwindigkeit	bis 6 m/s (21 km/h)
Angetriebene Achsen	2
Anzahl Lenkachsen	2

Die aktuelle Generation von AGV wird über einen diesel-elektrischen Antriebsstrang angetrieben. Hierbei erzeugt eine Einheit aus Dieselmotor und Generator den elektrischen Strom, der in den nach geschalteten Elektromotoren in Vortriebsleistung umgewandelt wird. Für die Entwicklung des batterie-elektrischen Fahrzeugs bedeutet dies, dass der Dieselmotor

und der Generator durch eine Traktionsbatterie ersetzt werden müssen, die die erforderliche Energie zur Verfügung stellen kann.

### **Batterieauslegung**

Im Vorfeld des Projekts wurde eine umfangreiche Untersuchung zur Eignung der derzeit verfügbaren Batterietechnologien für die Anwendung im AGV vorgenommen. Das Ergebnis ist, dass für diese Anwendung geschlossene Blei-Säure-Batterien eingesetzt werden, die sich seit vielen Jahren im industriellen Einsatz von Flurförderzeugen bewährt haben. Gegenüber der noch relativ neuen Li-Ion-Technologie weist dieser Batterietyp eine geringere Leistungs- und Energiedichte auf, zeichnet sich aber durch eine deutlich bessere Wirtschaftlichkeit und ein hohes Maß an Standardisierung aus.

Die elektrischen Kenngrößen Spannung und Strom der Batterie sollen sich an der bisher eingesetzten Dieselmotor-Generator-Einheit orientieren. Üblicherweise werden Blei-Säure-Batterien für Flurförderzeuge je nach Leistungsklasse in den Konfigurationen 24 V, 48 V und 80 V eingesetzt. Für das AGV ist eine deutlich höhere Spannungslage erforderlich, so dass für die AGV-Batterie neun Batterien á 80 V in Reihe geschaltet werden. Die Batterie hat dann eine Nennspannung von 720 V.

Darüber hinaus wurde zusammen mit dem Betreiber CTA die minimal zu erzielende Fahrzeit bzw. Einsatzzeit mit einer Batterieladung diskutiert. Hierbei sind zwei gegenläufige Zielsetzungen zu berücksichtigen. Aus logistischen Gründen soll die Fahrzeit möglichst lang sein, so dass die Ausfallzeit für den Batteriewechsel und die Anfahrt zur Batteriewechselstation möglichst gering ausfallen. Andererseits soll die Batterie möglichst leicht sein, damit die bewegte Masse des Fahrzeugs und der damit verbundene Energiebedarf gering bleiben.

Da die Anforderungen aus der Logistik jedoch überwiegen, wurde versucht, eine möglichst große Batterie in das Fahrzeug zu integrieren. Die Forderung für die minimale Einsatzzeit mit einer Batterieladung wurde von CTA und GPT auf 8 h festgesetzt. Die 8 h Einsatzzeit beinhalten einen Fahranteil von 40 % und einen betriebsbedingten Stillstandsanteil von 60%, was der Situation bei voller Auslastung des Terminals entspricht. In Zeiten schwacher Auslastung kann die Einsatzzeit deutlich höher liegen, da der Energiebedarf bei stehendem Fahrzeug nahezu Null ist. Zusammen mit dem aus diversen Voruntersuchungen bekannten Energiebedarf der Fahrzeuge und der batteriespezifischen zulässigen Entladegrad von 80% wurde eine theoretisch erforderliche Kapazität von etwa 300 Ah berechnet.

Innerhalb des Projekts sollten zwei unterschiedliche Varianten der Blei-Säure-Batterien untersucht werden. Bei der Batterie 1 ist die negative Elektrode aus Kupferstreckmetall ausgeführt, das einen niedrigen Innenwiderstand der Zellen bewirkt. Durch einen geringen Innenwiderstand der Zellen wird der Spannungseinbruch bei hohen Strömen verringert und die Verlustleistung in der Batterie gesenkt. Die Batterie 2 verfügt über eine Luftführung, die eine Elektrolytumwälzung während des Ladevorgangs ermöglicht. Durch die Elektrolytumwälzung soll nach Herstellerangaben die Ladedauer bei einer Vollladung um etwa 30 min verkürzt werden.

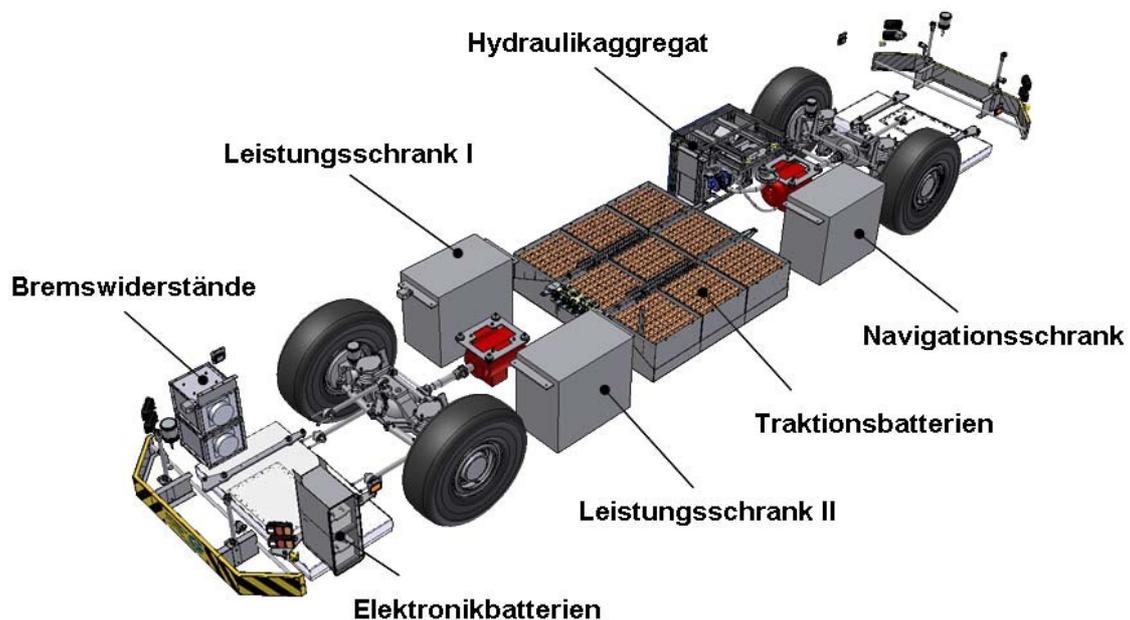
Auf Basis der genannten Auslegungskriterien wurden zwei Batterien von zwei unterschiedlichen Herstellern ausgewählt. Die Kennwerte der Batterien sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Beide Batterien sind mit einer höheren als der theoretisch erforderlichen Kapazität ausgewählt worden, da in der theoretischen Betrachtung Alterung und ungünstige Umgebungsbedingungen nicht berücksichtigt sind. Die dargestellten Abmessungen und Massen der Batterien lassen erahnen, dass durch den Einsatz der Traktionsbatterien als Energiespeicher die Bauraumaufteilung des Fahrzeugs vollständig neu überdacht werden musste.

**Tabelle 2:** Kennwerte Batterien

	Batterie 1	Batterie 2
Batterietyp	Blei-Säure-Batterie	Blei-Säure-Batterie
Technologie	Negative Elektrode aus Kupferstreckmetall	Luftführung für Elektrolytumwälzung
Nennspannung	720 V	720 V
Nennkapazität (C5)	400 Ah	460 Ah
Volumen (ohne Tragrahmen)	3,57 m <sup>3</sup>	4,08 m <sup>3</sup>
Masse (ohne Tragrahmen)	9.120 kg	10.870 kg

### Fahrzeugchassis

Aufgrund der hohen Masse der Traktionsbatterie muss diese zentral im Fahrzeug angeordnet sein, damit die Last gleichmäßig auf die vier Räder abgetragen wird. Dies hat zur Folge, dass das Fahrzeugchassis mit der Batterieaufhängung neu konstruiert werden musste. Die vormals auf einer Seite des AGV angeordneten Schaltschränke mussten ebenfalls modifiziert und neu positioniert werden. In der Abbildung 5 ist die Bauraumaufteilung für das Batterie-AGV dargestellt, das Chassis ist für eine bessere Sichtbarkeit ausgeblendet.

**Abbildung 5:** Bauraumaufteilung

Die wechselbare Traktionsbatterie ist in Fahrzeuglängs- und -querrichtung mittig angeordnet. Um die Batterie herum sind die Leistungsschränke I und II, der Navigationsschrank und das Hydraulikaggregat positioniert. Die Leistungsschränke I und II beinhalten sämtliche elektrische Komponenten zur Schaltung der Batterie und zur Ansteuerung der Fahrmotore. Im Navigationsschrank sind die speicherprogrammierbare Steuerung und der Navigationsrechner installiert. Des Weiteren verfügt das Fahrzeug über zusätzliche Elektronikbatterien, die die Funktion der Rechner auch während des Batteriewechsels und

bei einer Störung der Traktionsbatterie aufrecht erhalten können. Das Fahrzeug bremst während des Betriebs über die Fahrmotore, die dann in den generatorischen Betrieb gehen. In diesem Fall wird Energie in die Batterie zurückgespeist. Bei einer voll geladenen Batterie ist die Rückspeisung jedoch nur eingeschränkt möglich, so dass für diesen Fall die frei werdende Energie in Bremswiderständen in Wärme umgesetzt werden muss.

### **Hydraulische Anlage**

Eine weitere Änderung im Fahrzeugkonzept ist die hydraulische Anlage des AGV, die für die Betätigung der Lenkung, der Klappeinweiser und der Not- und Haltebremse eingesetzt wird. Die Klappeinweiser werden je nach Containergröße aktiviert und dienen bei der Beladung als Positionierhilfe und während des Fahrens als Verrutschsicherung. Die Not- und Haltebremse ist als Lamellenbremse ausgeführt und wird vor dem Losfahren hydraulisch geöffnet und bei Fahrzeugstillstand wieder geschlossen. Da die Lamellenbremsen während des Fahrens nur offen gehalten werden müssen, sind kein Volumenstrom und daher auch keine hydraulische Leistung erforderlich.

Um einen effizienten Betrieb der hydraulischen Anlage sicherzustellen bzw. Verlustleistungen der Hydraulik zu reduzieren, wurde eine lastabhängige Druckvorsteuerung in Kombination mit einer Speicherladeschaltung als energiesparende Maßnahme entwickelt. Die erforderlichen Lenkkräfte sind stark abhängig von der Beladung des Fahrzeugs, so dass bei niedriger Beladung oder Leerfahrt der Hydraulikdruck abgesenkt werden kann.

Da die Lamellenbremsen bauartbedingt jedoch einen Mindestdruck benötigen, wurde eine Speicherladeschaltung eingesetzt. Vor dem Losfahren des AGV wird zunächst die Hydraulikpumpe eingeschaltet und der Druck hochgefahren bis der Membranspeicher geladen und die Lamellenbremsen geöffnet sind. Anschließend kann der Systemdruck je nach Beladungszustand abgesenkt werden. Der Druck in den Bremsen wird über den Membranspeicher aufrecht erhalten. Auf diese Weise werden die Not- und Haltebremsen von Rest des hydraulischen Kreises entkoppelt.

Alle für den Aufbau der beiden Fahrzeuge und der vier Wechselbatterien benötigten mechanischen und elektrischen Komponenten wurden im Rahmen dieses AP nach den funktionellen Anforderungen und den aktuell gültigen technischen Regeln durch die zuständigen Fachabteilungen von GPT ausgelegt.

### **AP 1.2: Konstruktive Ausgestaltung Fahrzeug (GPT)**

Im Anschluss an die Auslegung des neuen Fahrzeugs und dessen Komponenten wurde mit der konstruktiven Umsetzung begonnen. Wie bereits erwähnt, musste für die Integration der Traktionsbatterien die Bauraumaufteilung vollständig neu gestaltet werden.

Die Herausforderung bei der Integration der Traktionsbatterie in das Fahrzeug lag in den großen Abmessungen und der hohen Masse, wobei gleichzeitig noch genügend Freiraum für den Manipulator für den automatisierten Batteriewechsel zur Verfügung stehen musste. Außerdem muss die Aufhängung der Batterie so gestaltet sein, dass jede Batterie nach dem Batteriewechsel sicher in das Fahrzeug eingesetzt und elektrisch kontaktiert werden kann. Auf die Besonderheiten der Kontaktierung der Batterie im Fahrzeug wird in AP 1.3 eingegangen.

Aufgrund der hohen Masse der Traktionsbatterien wurden auch diverse Leichtbaumaßnahmen mit dem Projektpartner CTA am Fahrzeugchassis diskutiert. Aufgrund der kurzen Entwicklungszeit und der Notwendigkeit einer besonders hohen Robustheit der Fahrzeuge wurde diese Maßnahme jedoch nicht umgesetzt. In der Abbildung 6 ist das CAD-Modell des Batterie AGV mit der Farbgebung von CTA dargestellt.



**Abbildung 6:** CAD-Modell des Batterie-AGV

Eine weitere Herausforderung war die Integration einer Schutzeinrichtung für die Batterien vor Feuchtigkeit und Verschmutzung. Die Oberseite der einzelnen Zellen auf denen sich auch die Batteriepole befinden, müssen vor Feuchtigkeit und Verschmutzung geschützt werden. Gleichzeitig müssen die Zellen ausreichend belüftet sein, damit austretende Gasung sicher entweichen kann. Nach einer Abwägung der Vor- und Nachteile unterschiedlicher Lösungen wurde eine fahrzeugseitige Abdeckung als Batterieabdeckung ausgewählt. Die Fahrzeugseite, auf der die Batterie für den Wechselvorgang herausgenommen wird, ist mit einer Rolltür versehen. Die Rolltür wird über einen Elektromotor betätigt und ist in die Fahrzeugsteuerung eingebunden.

Neben den offensichtlichen Änderungen am Fahrzeug stellen auch die weniger sichtbaren Änderungen einen sehr hohen konstruktiven Aufwand dar. Die Neugestaltung des Bauraums erforderte eine durchweg neue Führung der elektrischen und hydraulischen Versorgung. So mussten beispielsweise die Verlegung aller Leistungs- und Datenkabel mitsamt Befestigung neu gestaltet werden, um ausreichend Freiraum für die Batterie zu erhalten. Dies galt ebenso für die Verrohrung und Verschlauchung der hydraulischen Anlage.

Alle für den Aufbau erforderlichen technischen Unterlagen wie z.B. technische Zeichnungen und Schaltpläne wurden durch die Fachabteilungen bei GPT erstellt und der Arbeitsvorbereitung zur Verfügung gestellt. Die beim späteren Aufbau und der Inbetriebnahme der Fahrzeuge aufgetretenen Änderungsmaßnahmen wurden in der Dokumentation ergänzt.

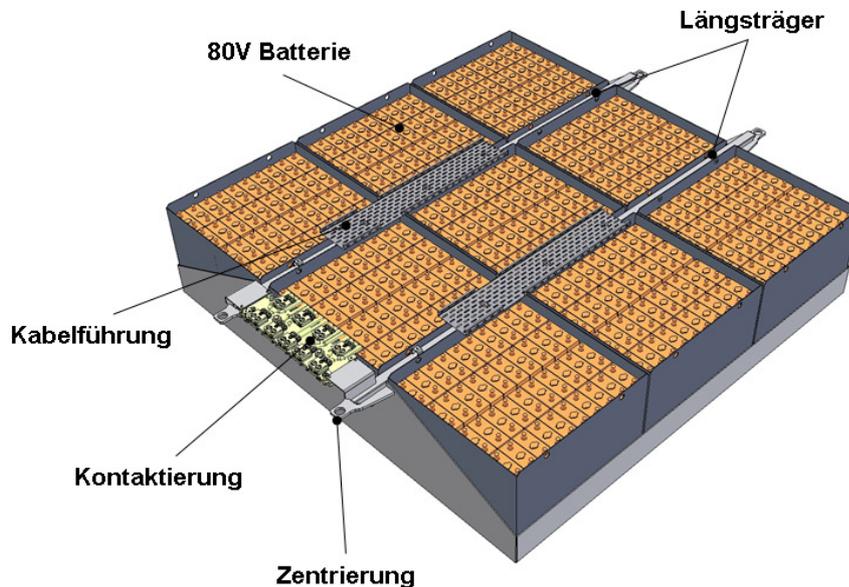
### **AP 1.3: Konstruktive Ausgestaltung Batteriewechselrahmen (GPT)**

Das vorgestellte System basiert auf einer Batteriewechselstrategie, so dass der funktionalen Einheit der wechselbaren Batterie eine zentrale Bedeutung zukommt. Bei einem Batteriewechsel wird zunächst die Rolltür automatisch geöffnet und die entladene Batterie mit Hilfe des Manipulators der Batteriewechselstation aus dem Fahrzeug entnommen.

Um einen sicheren Batteriewechsel zu ermöglichen, wurde ein spezieller Batterietragrahmen für diesen Vorgang entwickelt und konstruiert. In den Batterietragrahmen werden neun standardisierte Blei-Säure-Batterien mit einer Nennspannung von 80 V eingesetzt, die dann zu einer Spannung von 720 V in Reihe geschaltet werden.

Der Batterietragrahmen basiert auf zwei Längsträgern, an deren Enden die Batterie im Fahrzeug aufgehängt wird. Die mechanische Schnittstelle zwischen Wechselrahmen und Fahrzeug ist als Zentrierung ausgeführt, die immer eine korrekte Position der Batterie im Fahrzeug sicherstellt und Toleranzen des Fahrzeugs, des Batterietragrahmens und bei der

Positionierung während des Batteriewechsels ausgleicht. Die Toleranzen können sowohl aus der Fertigung als auch aus der Positionierung der Batterie beim Batteriewechsel stammen. An den Längsträgern ist eine geschweißte Kastenstruktur angebunden, in die die neun Batterietröge eingesetzt werden können. Der Tragrahmen ist so konstruiert, dass er die beiden eingesetzten Batterien I und II aufnehmen kann. Dies ermöglicht es, dass prinzipiell jede Batterie in jedes Fahrzeug eingesetzt werden kann.



**Abbildung 7:** Aufbau Wechselbatterie

Mittels einer speziell für diese Aufgabe entwickelten Multikupplung wird die Batterie nach dem Batteriewechsel an die Fahrzeugelektrik angebunden. Der Kupplungsvorgang wird bei der Absetzbewegung der Batterie vorgenommen.

Bei der Konstruktion des Tragrahmens war die Abstimmung mit dem Lieferanten der Batteriewechselstation besonders wichtig. Damit im späteren Betrieb der Manipulator für den Batteriewechsel auch genügend Freiraum haben würde, musste die mechanische Schnittstelle Batterie-Manipulator exakt abgestimmt werden. Die Schnittstelle berücksichtigt die Aufnahmepunkte der Batterie, den benötigten Freiraum für den Manipulator und den Freiraum für die Batterie im angehobenen Zustand.

Wie bereits zuvor beschrieben, sind die Batterien während des Betriebs vor äußeren Verschmutzungen durch eine Batterieabdeckung in Form einer automatischen Rolltür geschützt. Die Rolltür wird für den Vorgang des Batteriewechsels automatisch geöffnet und anschließend wieder geschlossen.

Die für den Aufbau der vier Batteriewechselrahmen erforderlichen technischen Unterlagen wurden von den entsprechenden Mitarbeitern von GPT erstellt und der Arbeitsvorbereitung übergeben. Die während des Aufbaus und der Inbetriebnahme durchgeführten Änderungen wurden in die Dokumente begleitend eingepflegt.

#### **AP 1.4: Fahrzeugelektrik und Steuerung (GPT)**

Die Fahrzeuge weisen aufgrund ihres automatisierten Betriebs einen sehr hohen Anteil von steuerungstechnischen Komponenten auf. Sämtliche Informationen, die für die Ermittlung des aktuellen Fahrzeug- und Fahrzustands benötigten Größen, müssen über geeignete Sensoren erfasst und der Steuerung übermittelt werden. Neben den für die Navigation erforderlichen Größen Fahrzeugposition, Geschwindigkeit und Lenkwinkel müssen auch diverse andere Kenngrößen wie Temperaturen, Füllstände oder Hydraulikdruck kontinuierlich erfasst werden.

Aufgrund des neuen, batterie-elektrischen Antriebs mussten zudem neue Funktionen in der Elektronik abgebildet werden. Neben der Erfassung des Batterieladezustands musste die Ansteuerung der hydraulischen Anlage komplett neu erarbeitet werden, da die Hydraulikpumpe nun nicht mehr über den Nebenantrieb des Dieselmotors sondern über einen separaten Elektromotor angetrieben wird. Des Weiteren wurde ein Schaltungskonzept für die Traktionsbatterie entwickelt, das eine sichere Zu- und Abschaltung der Batterie vom Fahrzeug garantiert. Diese Aufgabe wurde sehr intensiv bearbeitet, da die hohe Spannung bei einer Fehlfunktion lebensgefährlich sein kann.

Wie im AP 1.2 bereits ausgeführt, wurden aufgrund der neuen Bauraumaufteilung die Schaltschränke komplett neu strukturiert. Ein Schaltschrank beinhaltet alle Komponenten zur Fahrzeugsteuerung und -navigation. In den übrigen beiden Schränken sind einerseits die für die sichere Zu- und Abschaltung der Batterie erforderlichen Elemente und andererseits die Frequenzumrichter untergebracht. Die geänderte Anordnung der Schaltschränke erforderte gleichzeitig eine aufwändige Anpassung der Kabelführungen im gesamten Fahrzeug.

Neben der Maschinensteuerung, in der die für den Fahrbetrieb erforderlichen Aktionen und Bewegungen vorgegeben werden, musste auch die Navigationssoftware an die neuen Anforderungen angepasst werden. Insbesondere musste die Erfassung des Batterieladezustands in die Navigationssoftware integriert werden, da diese mit dem AGV-Managementsystem kommuniziert. Bei der Detektierung eines niedrigen Ladezustands wird das Batterie-AGV automatisch für einen Batteriewechsel zur Batteriewechselstation beordert. Hierzu musste die Schnittstelle zwischen der Navigationssoftware und des AGV-Managementsystems erweitert werden. Die Abläufe rund um den Batteriewechsel werden detailliert innerhalb der APG 2 beschrieben.

Für den Batteriewechselvorgang ist die exakte Positionierung des Fahrzeugs innerhalb der Batteriewechselstation sehr wichtig, da die Freiräume für den Batteriemaneipulator sehr eng sind. Die zulässigen Toleranzen für das Fahrzeug in Fahrzeuginnen- und -außenrichtung liegen im Bereich weniger Zentimeter. Um die Schiefstellung eines Fahrzeugs und damit auch der Batterie ausgleichen zu können, wurde entschieden, in die Fahrzeuge zusätzlich ein Gyroskop einzubauen, mit dem die Geradeausfahrt der Fahrzeuge und damit die exakte Positionierung innerhalb der BWS sichergestellt werden konnte. Dieser zusätzliche Sensor musste innerhalb der Navigationssoftware aufwändig in die Algorithmen eingebunden werden. Die Kosten für die Gyroskope wurden durch GPT getragen.

Die für den Aufbau und Betrieb erforderlichen technischen Unterlagen wie Schaltpläne, Stromlaufpläne und Programmcodes wurden durch die Mitarbeiter der Fachabteilungen bei GPT erstellt. Während des Aufbaus und der Inbetriebnahme sind erforderliche Änderungen und Anpassungen direkt ergänzt worden. Aufgrund des geänderten Antriebsstrang und neuer Funktionen und Betriebsweisen der AGV wurden sowohl die SPS-basierte Maschinensteuerung als auch die für die Routenführung und Kommunikation verantwortliche Navigationssoftware umfangreich überarbeitet.

### **AP 1.5: Aufbau Fahrzeuge und Batteriewechselrahmen (GPT)**

Gegenstand des Projekts war die Umrüstung von zwei diesel-elektrischen AGV aus dem Bestand von CTA auf einen batterie-elektrischen Antrieb mit wechselbaren Traktionsbatterien. Hierzu wurde zunächst zwischen CTA und GPT abgestimmt, welche Fahrzeuge für die Umrüstung in Frage kämen und welche Komponenten der bestehenden Fahrzeuge weiter verwendet werden können.

Die beiden ausgewählten Fahrzeuge wurden dann im Dezember 2010 auf Kosten von GPT nach Düsseldorf transportiert und die für die Verwendung im Batterie-AGV bestimmten Komponenten anschließend demontiert und für die erneute Verwendung vorbereitet, z.B. gesäubert oder neu justiert. Im Batterie-AGV weiter verwendet werden vorrangig kostenintensive Komponenten, die leicht demontiert und ohne Modifikation wieder eingesetzt werden konnten. Dies betrifft beispielsweise die Baugruppen Achsen und Räder, Fahrmotore

und Frequenzumrichter sowie Navigationsrechner und -antennen. Dagegen wurde das Fahrzeugchassis neu beschafft, da die erforderlichen Modifikationen in keinem Verhältnis zu den dafür erwarteten Kosten gestanden hätten. Durch die Umrüstung von zwei Fahrzeugen konnten die Projektkosten gegenüber dem Aufbau von zwei komplett neuen Fahrzeugen deutlich gesenkt werden.

Nachdem die Auslegung und die Konstruktion von Fahrzeugen und Batterien im Dezember fast abgeschlossen werden konnte, wurde im Januar mit den Arbeiten für den Aufbau der Versuchsfahrzeuge und der vier Traktionsbatterien begonnen. Der Aufbau der Fahrzeuge und der Batterien erfolgte ausschließlich im Werk von GPT in Düsseldorf, wobei viele Komponenten durch Zulieferer bereitgestellt wurden.

Für den Aufbau wurden zunächst die wieder zu verwendenden Komponenten aus den beiden von CTA zur Verfügung gestellten diesel-elektrisch angetriebenen AGV entfernt und für den Einbau in die Batterie-AGV vorbereitet. Parallel dazu wurden Einzelteile und Baugruppen anhand der technischen Unterlagen gefertigt, die anschließend zusammen mit den mechanischen und elektrotechnischen Zukaufkomponenten in das Chassis integriert wurden.

In der **Abbildung 8** ist ein Zwischenstand dargestellt, bei dem ein Großteil der Komponenten bereits an dem neuen, fertig lackierten Chassis montiert ist. Die Montage der Räder sowie der Batterieabdeckung war zu diesem Zeitpunkt noch nicht erfolgt.



**Abbildung 8:** Batterie-AGV in der Fertigung

Der Aufbau der Fahrzeuge und Batterien stellte einen sehr zeit- und kostenintensiven Teil der Arbeiten von GPT dar, der aus wissenschaftlicher Sicht jedoch nicht besonders ergiebig ist. Aufgrund der sehr kurzen Projektlaufzeit war eine sehr gute Abstimmung der einzelnen Gewerke erforderlich. Für die zeitgerechte Fertigstellung der Arbeiten mussten einige standardisierte Abläufe in der Fertigung umgangen werden, was nur durch die intensive Einbindung der Arbeitsvorbereitung, der Fertigungssteuerung und der Meister geleistet werden konnte.

Mit Tätigkeiten im Bereich der technischen Begleitung waren die Ingenieure der Abteilung „Container Technik“ der HHLA-Container-Holding HHCT im Auftrage der HHLA CTA GmbH betraut. Hierbei ging es beispielsweise anfänglich in Diskussionen mit dem Verbundpartner

Fa. Gottwald darum, ob und welche Gewichtseinsparungen an einem neu zu konstruierenden Batterie-AGV vorgenommen werden können ohne dabei die Robustheit des Fahrzeuges zu gefährden. Zudem wurden Entscheidungen getroffen wonach z.B. die doppelte Glühlampenbeleuchtung an den Fahrzeugecken gegen eine einfache LED-Beleuchtung ausgetauscht wird – was zusätzlich Energie spart. Im Ergebnis lässt sich zusammenfassen, dass die Änderungen an der bisher bewährten Fahrzeugtechnik relativ gering waren und somit auch die Mitwirkung und Aufwände für CTA im AP 1.5.

#### **AP 1.6: Inbetriebnahme Fahrzeuge (GPT)**

Im Anschluss an den Aufbau der Fahrzeuge und der Batterien wurden zunächst die einzelnen Teilsysteme einem Funktionstest unterzogen und die sicherheitsrelevanten Funktionen überprüft. Hierzu zählten die Kontrolle der elektrischen Verdrahtung, der hydraulischen Verschaltung sowie die korrekte Anzeige der eingesetzten Sensoren und NOT-AUS-Funktionen. Die Funktionstests erfolgten in der Werkshalle bei aufgebocktem Fahrzeug. Im nächsten Schritt wurden die Schnittstellen zwischen den Teilsystemen aktiviert und auf ihre ordnungsgemäße Funktion getestet.

Das Einsetzen der Batterien in das Fahrzeug wurde mit Hilfe des in der Fertigungsstätte vorhandenen Hallenkrans simuliert. Dabei konnte die Funktion zur Übertragung der elektrischen Energie von der Batterie in das Fahrzeug und die vorgesehenen Mechanismen zum Ausgleich von Positionier- und Fertigungstoleranzen bereits vor Aufbau der Wechselstation getestet werden.

Die eigentliche Inbetriebnahme der Fahrzeuge wurde auf dem AGV-Testfeld auf dem Gelände von Gottwald in Düsseldorf durchgeführt. Das Testfeld verfügt über die gleiche Ausstattung wie die AGV-Fahrfläche bei CTA, so dass auch hier die Fahrzeuge vollständig automatisiert fahren können. Es wurden alle für den späteren operativen Einsatz benötigten Fahrmanöver erfolgreich getestet inklusive einer Beladung mit 60 t Nutzlast, siehe **Abbildung 9**.



**Abbildung 9:** Inbetriebnahme Düsseldorf

Das Aufladen der Batterien nach den Testfahrten erfolgte innerhalb der Fahrzeuge, es wurden also keine Batterien gewechselt. Dieser Vorgang wurde so auch zu Beginn des Feldversuchs auf dem Gelände von CTA durchgeführt, solange die Batteriewechselstation noch nicht in Betrieb genommen werden konnte.

Bei der Inbetriebnahme der Fahrzeuge musste leider festgestellt werden, dass die Funktion der Speicherladeschaltung, wie sie im AP 1.1 beschrieben ist, nicht genutzt werden kann. Die aus den Bestandsfahrzeugen verwendeten Ventile für die Not- und Haltebremsen weisen einen zu hohen Leckölstrom auf, so dass der Öffnungsdruck durch den Membranspeicher nur wenige Sekunden gehalten werden kann. Demzufolge müsste der abgesenkte Systemdruck ständig wieder angehoben werden, um den Membranspeicher wieder mit Öl zu füllen. Diese sehr häufige Nachregelung verspricht keinen energetischen Vorteil, sondern birgt sogar regelungstechnische Risiken. Aus diesem Grund wurde die Speicherladeschaltung für die Projektlaufzeit stillgesetzt. Für einen erfolgreichen Einsatz der Speicherladeschaltung müssten neue Ventile eingesetzt werden, was die Möglichkeiten des Projekts jedoch überschreitet.

Nach einer erfolgreichen Inbetriebnahme, bei der die Funktionen und Fahrleistungen der Batterie-AGV nachgewiesen werden konnten, erfolgte die Auslieferung der beiden Fahrzeuge zum CTA im April bzw. Mai auf Kosten von GPT.

### **AP 1.7: Integration SuperCaps (GPT)**

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde der Einsatz eines zusätzlichen Kurzzeit-Energiespeichers in Form von SuperCaps untersucht mit dem Ziel, Leistungsspitzen von der Batterie fern zu halten und einen möglichst hohen Anteil an Bremsenergie rekuperieren zu können.

Seitens Gottwald wurde eine entsprechende Vorauslegung eines Systems bestehend aus SuperCaps und einer geeigneten Leistungselektronik gemäß der Vorhabensbeschreibung

vorgenommen. Parallel zur Traktionsbatterie ist der „Leistungsspeicher“ bestehend aus SuperCap-Modul und Leistungselektronik geschaltet. Die Leistungselektronik ist erforderlich, um die vom Ladezustand der Kondensatoren abhängige Spannung auf das aktuelle Niveau der Batterie anzuheben.

Bei Gottwald liegen bereits Erfahrungen für den Einsatz von SuperCaps für die Deckung von Leistungsspitzen und die Rekuperation von Bremsenergie bei diesel-elektrisch betriebenen Hafemobilkränen vor, siehe Abbildung 10. Auf Basis dieser Erfahrungen wurden Gespräche mit möglichen Lieferanten geführt und eine Vorauswahl entsprechender, derzeit verfügbarer Komponenten getroffen.

Die angestellten theoretischen Betrachtungen in Verbindung mit den am Institut für Kraftfahrzeuge, Aachen (ika) durchgeführten Simulationen und Prüfstandsmessungen haben gezeigt, dass im vorliegenden Fall des AGV die Leistungsgrenzen der eingesetzten Batterien bei Weitem nicht erreicht werden und bereits mit den Batterien allein ein beträchtlicher Anteil an Bremsenergie rekuperiert werden kann. Das Potential für eine Steigerung der rekuperierbaren Energie durch den Einsatz von SuperCaps ist nur gering. Wie in den Ausführungen des ika in AP 5.4 deutlich wird, liegt der Wirkungsgrad des Antriebsstrangs mit SuperCaps aufgrund der mehrfachen Umwandlung der Energie sogar unterhalb des Antriebsstrangs ohne Kurzzeit-Energiespeicher.

#### SuperCap-Modul Fa. Maxwell



#### Gleichstromwandler Fa. Refu



<b>Kapazität</b>	<b>63F</b>	<b>Spannungslage 1</b>	<b>600... 700 V</b>
<b>Nennspannung</b>	<b>125 V</b>	<b>Spannungslage 2</b>	<b>62... 125/ 250V</b>
<b>Arbeitsspannung</b>	<b>62...125 V</b>	<b>Stromausgang</b>	<b>150 A</b>
<b>Nennstrom</b>	<b>150 A</b>		
<b>Verfügbare Energie</b>	<b>0,102 kWh</b>		

**Abbildung 10:** SuperCap-Modul und Leistungselektronik

Diese Tendenz war bereits frühzeitig erkennbar, noch bevor alle Simulations- und Versuchsergebnisse vorlagen, so dass beim Projektträger eine Änderung des Arbeitsplans beantragt und auch genehmigt wurde. Aus technischer Sicht bietet der Einsatz eines zusätzlichen Kurzzeit-Energiespeichers bei dieser Anwendung keine nennenswerten Vorteile.

Bei einer überschlägigen Wirtschaftlichkeitsberechnung, bei der zunächst eine Energieeinsparung von 10 % angenommen wurde, die im Nachhinein jedoch in keiner Weise nachgewiesen werden konnte, würde sich bei den derzeitigen Marktpreisen die Amortisation der zusätzlichen Kosten erst nach 57.000 Betriebsstunden einstellen. Da die Amortisationszeit die von GPT prognostizierte Lebensdauer für die Fahrzeuge von 50.000 Betriebsstunden übertrifft, ist der Einsatz aus wirtschaftlicher Sicht selbst bei einer angenommenen Energieeinsparung von 10 % nicht sinnvoll.

Aus den genannten Gründen wurde daher auf die physische Integration des Kurzzeit-Energiespeichers in eines der beiden Prototypenfahrzeuge, wie ursprünglich im AP 1.7

ursprünglich vorgesehen war, verzichtet. Hieraus folgt, dass auch die beiden Arbeitspakete „Inbetriebnahme von einem Versuchsfahrzeug mit der Kombination Bleibatterie mit SuperCaps“ (AP 1.8) und „Feldversuch SuperCaps“ (AP 4.5) nicht bearbeitet wurden.

**AP 1.8: Inbetriebnahme Fahrzeug mit SuperCaps**

Aufgrund der in AP 1.7 gewonnenen Erkenntnisse und der daraufhin genehmigten Änderung des Arbeitsplans entfällt dieses Arbeitspaket.

## 3.2 APG 2: Batterielade- und Wechselstation

Neben dem Aufbau der beiden Batterie-AGV und der Traktionsbatterien waren die Entwicklung, der Aufbau und die Integration der Batteriewechsel- und Ladestation eine zentrale Aufgabe des Verbundprojekts. Das System Batterie-AGV basierend auf der Batteriewechselstrategie kann nur erfolgreich sein, wenn das Zusammenspiel zwischen Fahrzeugen, Batteriewechselstation und Logistik einwandfrei funktioniert.

Die APG 2 wurde durch die Projektpartner CTA und GPT bearbeitet, wobei die programmtechnische Anpassung des AGV-Managementsystems durch die Tochterfirma TBA B.V. von GPT in Form einer FE-Fremdleistung erbracht worden ist. Die Umsetzung der Batteriewechselstation wurde an eine renommierte Firma aus dem Bereich Lagerlogistik für schwere Lasten vergeben. Aufgrund der kurzen Projektlaufzeit wäre eine Eigenentwicklung durch GPT nicht möglich gewesen.

Im Hinblick auf die Batterielade- und -wechselstation (BWS) war CTA mit seinen Unterauftragnehmern in Arbeitspaketgruppe 2 für die Infrastruktur (Standort, Strom-, Netzwerkversorgung), die Herstellung der Fahrfläche, die Herstellung der Regalfundamente und die Errichtung der Stationseinhausung zuständig. Die sonstigen unmittelbaren Vorhabenskosten für HHLA-fremde Unterauftragnehmer (z.B. Baufirmen) wurden direkt in das AP 2 gebucht. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden diese Leistungen in den AP 2.2 und AP 2.4 zusammenhängend beschrieben.

Ferner war CTA für die softwareseitige Einbindung der BWS in den laufenden Terminalbetrieb zuständig. Diese Aktivitäten sind detailliert in AP 2.3 beschrieben.

### AP 2.1: Ausgestaltung Wechselstation (GPT)

Die Batteriewechselstation (BWS) kann in folgende Systembestandteile gegliedert werden:

- Batteriemaniplator (Regalbediengerät) zum Ein- und Auslagern von Batterien in Fahrzeug und Batterieladeregal
- Batterieladeregal
- Steuerung
- Ladegeräte
- Multikupplungen (Schnittstelle zwischen Batterien und Ladegeräten)

Gottwald hat diese Systembestandteile im Rahmen des Förderprojekts zu einer funktionsfähigen BWS zusammengeführt. Die einzelnen Teilsysteme wurden in enger Zusammenarbeit mit verschiedenen Zulieferern ausgestaltet und umgesetzt.

Zu Beginn des Förderprojekts wurde für den Batteriemaniplator (inkl. Batterielagerregal und Steuerung) eine umfangreiche Spezifikationen erstellt, in der alle notwendigen Anforderungen an eine Batteriewechselstation für Batterie-AGV zusammengefasst sind, z.B.:

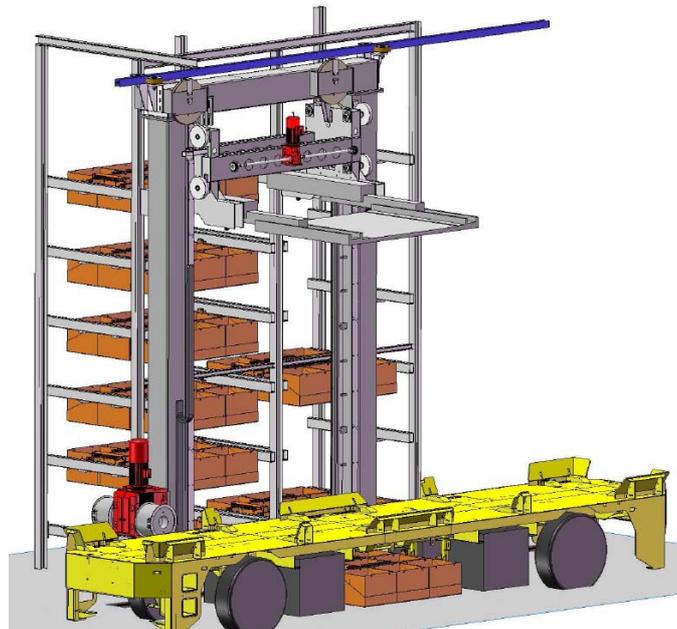
- Traglast
- Wechselzeit
- Positioniergenauigkeit
- verfügbarer Bauraum
- mechanische Schnittstelle zum AGV
- Bewegungsprinzip bei der Ein- und Auslagerung der Batterie
- Zentrierung der Batterien

- Einsatzbedingungen
- Erforderliche Steuerungsfunktionen für die Automatisierung

Auf dieser Grundlage wurden verschiedene Konzepte für den Batteriemanipulator mit potenziellen Lieferanten diskutiert und entsprechende Angebote eingeholt. Das beste Konzept wurde von der Fa. Vollert vorgestellt, sodass der Batteriemanipulator im Rahmen des Förderprojekts in enger Zusammenarbeit zwischen Gottwald und Vollert ausgestaltet und umgesetzt wurde.

Im nächsten Schritt wurden alle mechanischen Schnittstellen zwischen B-AGV und BWS ausgearbeitet und abgestimmt. Weiterhin wurden die räumliche Anordnung der BWS-Systembestandteile und der Aufstellort auf dem CTA-Terminal festgelegt. Die Konstruktionen des Regalbediengeräts und des Regals wurden von Vollert in enger Abstimmung mit GPT durchgeführt.

Die Batteriehandhabung erfolgt durch ein Regalbediengerät (RBG), das einen speziellen Teleskopauszug besitzt, der genau an die Bauraumanforderungen des B-AGV angepasst ist, Abbildung 11. Das RBG ist in der Lage, Batterien mit einer Masse von bis zu 12 t zu handhaben und exakt im B-AGV und im Lagerregal zu positionieren. Um die Fahrzeugposition für den vollautomatischen Batteriewechsel präzise zu erfassen, wird diese über Positionsfinder und Referenzmarken sensortechnisch erfasst. Die Batterien werden in einem Hochregal mit 12 Lagerplätzen gelagert.



**Abbildung 11:** Batteriewechselstation (Quelle: Fa. Vollert)

Zum Laden der Batterien wurde gemeinsam mit einem Ladegeräthersteller ein spezielles Mehrfachladegerät erarbeitet, das neun 80 V Ladegeräte in einem Schaltschrank örtlich und funktionell zusammenfasst. Steuerungstechnisch sind die Einzelladegeräte zu einem Mehrfachladegerät integriert.

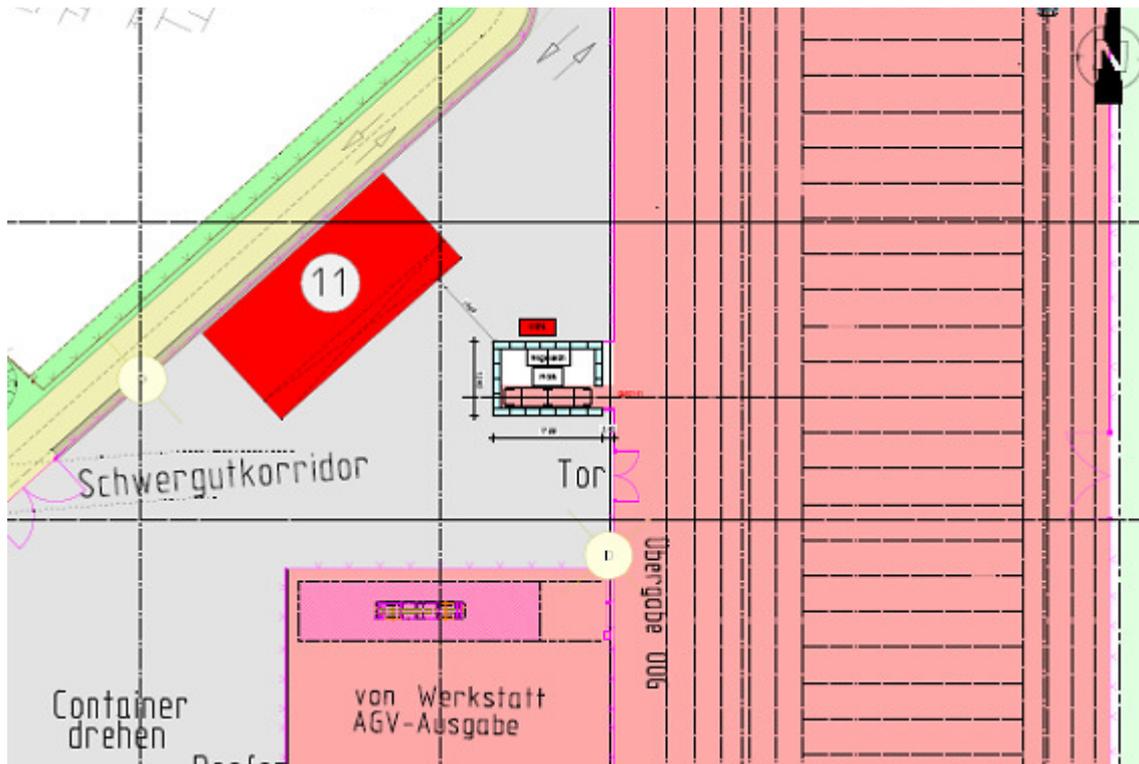
Zwei Lagerplätze sind mit Kupplungsplatten ausgestattet und jeweils mit einem Mehrfachladegerät verbunden, sodass zwei Ladeplätze zur Verfügung stehen.

Da die BWS im Rahmen des Feldversuchs auf einem bestehenden Terminal aufgebaut wurde und in den Betrieb eingebunden ist, mussten die herrschenden Sicherheitsstandards eingehalten werden. Hierfür wurde gemeinsam mit dem Projektpartner CTA ein

umfangreiches Sicherheitskonzept ausgearbeitet, das einen sicheren Betrieb für Mensch und Maschine nach den betrieblichen Vorgaben von CTA gewährleistet.

### AP 2.2: Auslegung der Infrastruktur (HHLA)

Voraussetzung für die Errichtung einer Batteriewechselstation war die Bestimmung eines geeigneten Standortes. Dieser fand sich im Norden des Terminals, da dort keine Konstruktionen (z.B. Verrohrungen) im Erdreich vorhanden waren und dieser Standort und die Arbeiten an der BWS (Platzbedarfe beim Aufbau) den laufenden Betrieb des Terminals am wenigsten behinderten.



**Abbildung 12:** Position der BWS auf dem CTA-Terminal

Bedingt durch die einzulagernden Gewichte im Hochregalsystem war hierfür auch eine Beachtung des entsprechenden Baugrunds notwendig. Ferner nahmen die einzulagernden Gewichte eine wichtige Rolle im Hinblick auf die Auslegung des Betonfundamentes für das Regal und das Regalbediengerät ein. Um die Kosten für die Fundamente nicht unnötig in die Höhe zu treiben wurde eine Konstruktion gewählt, die als eine Einheit hergestellt werden konnte und die ausschließlich die Lasten (max. 3 Wechselbatterien zeitgleich im Regal) aufnehmen kann, die im Rahmen des Projektes auftreten würden. Diese Konstruktion erleichtert zudem einen eventuellen späteren Abriss der Fundamente, wenn später einmal eine größere Station (an anderer Stelle auf dem CTA) gebaut werden sollte.

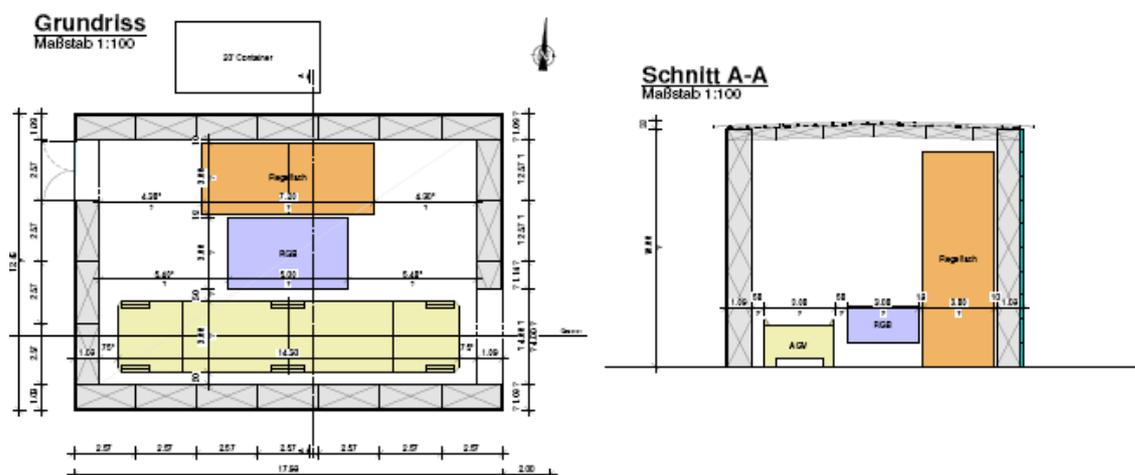
Da das Gelände aus Gründen der Regenwasserführung tlw. abschüssig verläuft war eine Asphaltanrampung an das waagerechte Fundament notwendig. Beides ist in folgender Abbildung erkennbar.



**Abbildung 13:** Fundament und Asphaltanrampung, Mitte März 2011

Die neu hergestellte Asphaltfläche wurde anschließend mit Transpondern ausgestattet und letztere seitens der CTA-Tochtergesellschaft SCA (Service Center Altenwerder GmbH) programmiert.

Eine besondere Herausforderung war die Gestaltung einer Einhausung der Batteriewechselstation. Insbesondere in zeitlicher Hinsicht. Die Erstellung eines festen Bauwerks (oder einer Leichtbauhalle) hätte einerseits deutliche höhere Kosten verursacht, aber vor allem auch behördliche Bauantragsverfahren etc. durchlaufen müssen, die eine rechtzeitige Fertigstellung fragwürdig erscheinen ließen - selbst wenn unverzüglich bei Projektstart im August 2010 alle Vorkehrungen getroffen worden wären. Eine durch die Ingenieure der von CTA beauftragten HHCT-Bauabteilung durchgeführte Markt-Eruierung ergab, dass eine Einhausung unter zeitlichen und kostentechnischen Aspekten aus einem voll zu verkleidenden Gerüstsystem herzustellen wäre. Die folgende Abbildung stellt dies zeichnerisch dar.



**Abbildung 14:** Prinzip der Einhausung

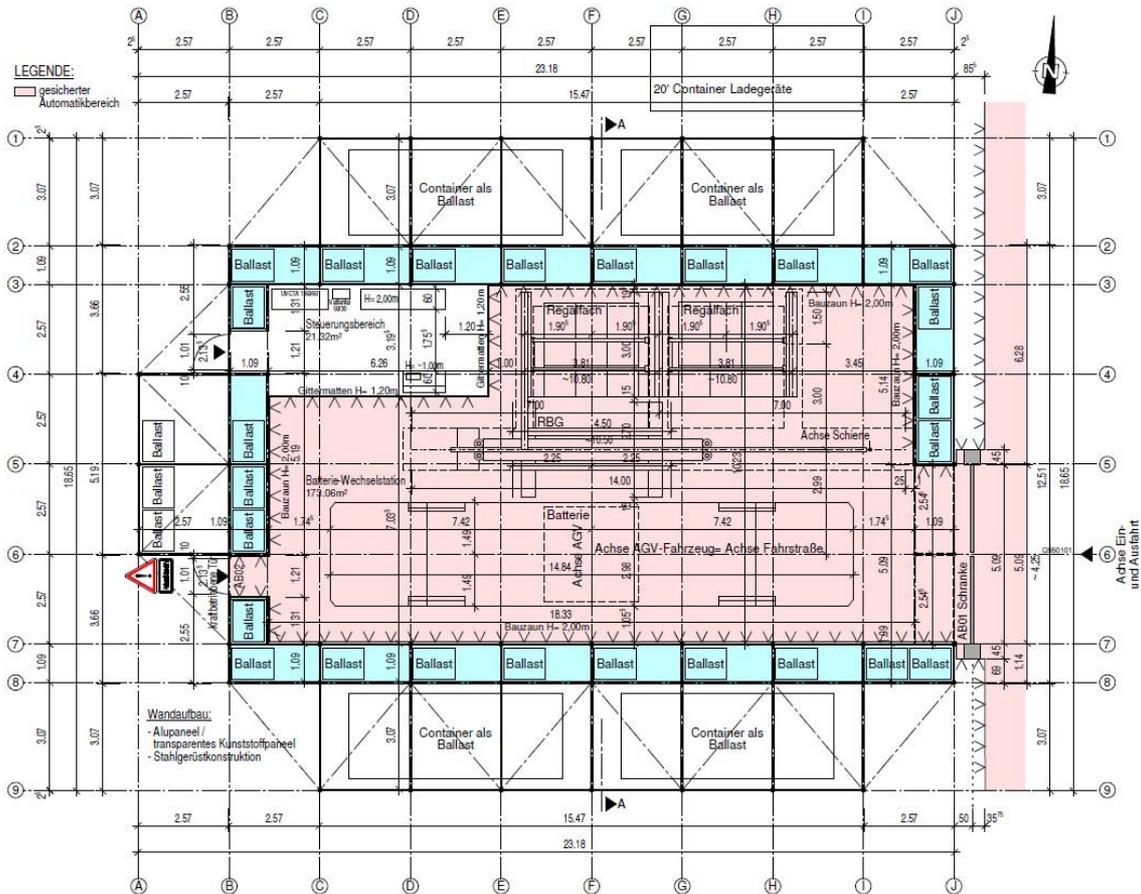
Die Einhausung wurde nur so groß konzipiert, wie sie für das Regal, das Regalbediengerät und ein B-AGV ausreichend war. Daher wurden einige wesentliche elektrische Komponenten (Ladegeräte) in einem 20' Container außerhalb der Station untergebracht. Auch dies vermied unnötige Kosten für eine größere Einhausung. Einzig die Schaltschränke für den

Elektroanschluss und für die Netzwerkversorgung wurden innerhalb eines begehbaren Bereiches (Steuerungsbereich) innerhalb der Station eingebaut. Gleiches gilt für die Leistungselektronik/Steuerung des Regalbediengerätes. Der Innenbereich der Station wurde von CTA zudem mit einem zusätzlichen WLAN-Accesspoint ausgestattet, so dass die Fahrzeuge innerhalb der Station weiterhin Steuerbefehle erhalten konnten – durch die Metallausführung der Wände der Einhausung zeigten sich hier anfänglich Funkabschattungen/-ausfälle.



**Abbildung 15:** Aufbau Schaltschränke (links Übergabe Stromkreis, rechts Steuerschrank RBG)

Der begehbare Bereich ist auf der folgenden Abbildung zu erkennen (Steuerungsbereich, weiß unterlegt, oben links). Er kann von befugtem Personal durch eine Tür jederzeit betreten werden. Der komplette restliche Innenbereich wurde als Erweiterung der sogenannten AGV-Automatikfläche deklariert (rosa unterlegt). Hier dürfen sich keine Personen während des Automatikbetriebs aufhalten.



**Abbildung 16:** Grundriss Batteriewechselstation

Für Wartungs- und ggf. Bergungsarbeiten ist jedoch ein zeitweiliges Betreten des Automatikbereiches innerhalb der Batteriewechselstation notwendig. Softwaretechnisch können hier Sperrbereiche definiert werden – diese Aufgabe war u.a. Inhalt in AP 2.3. Jedoch war es auch baulich notwendig entsprechende Vorkehrungen zu treffen, die in gemeinsamen Gesprächen mit dem Amt für Arbeitsschutz, der zuständigen Berufsgenossenschaft, dem Hersteller der Anlage (Fa. GPT bzw. Fa. Vollert) und den Fachkräften für Arbeitssicherheit des CTA erarbeitet wurden. Als wesentliche Maßnahme resultierte daraus eine Erweiterung der am CTA eingerichteten „Zutrittskontrolle Automatikbereich“ (ZKA). Das ist ein System aus Zäunen und Toren, das notwendigen Falls den Zutritt zu zuvor gesicherten Anlagenteilen ermöglicht bzw. im Falle eines unbefugten Zutritts zu einem Nothalt der AGV-Flotte führt. Die Erweiterung des ZKA-Systems sieht an dieser Stelle eine Zutrittsmöglichkeit zum Innenbereich/Automatikbereich der Batteriewechselstation durch eine automatisch betriebene und gesicherte Tür (auf Zeichnung Tür unten links) vor, sofern zuvor eine geschlossene Schrankenanlage (auf der Zeichnung rechts, Zufahrt für Batterie-AGV) sicherstellt, dass die Einfahrt von Batterie-AGV in die Station zum jeweiligen Zeitpunkt ausgeschlossen ist. Zusätzlich war eine Not-Aus-Kette für das Regalbediengerät bei Betreten des Automatikbereiches der Station vorzusehen um Gefährdungen durch das Regalbediengerät für Wartungs- und Bergungspersonal auszuschließen. Die Errichtung der Schranken-/Toranlage und die Umsetzung in der ZKA-Software erfolgten im Auftrag der CTA durch die Fa. EMIS.



**Abbildung 17:** Errichtung der Einhausung und der Schranke, Anfang April 2011

Zur Beschwerung des Gerüstbaus wurden Wasser- und Betongewichte verwendet, die tlw. in die im Gerüst integrierten Container eingebracht wurden.

Obgleich die gesamte Vorbereitungs- und Bauphase innerhalb von nur ca. 8 Monaten stattfand (September 2010 bis April 2011), war von den HHCT-Ingenieuren und -Architekten zu berücksichtigen, dass sämtliche Leistungen am Markt zuvor mit den entsprechenden Reaktionsfristen auszuschreiben waren. Koordinationsaufwand entstand für CTA und die HHCT-Ingenieure im Wesentlichen durch die Durchführung von notwendigen Bauablauf-Besprechungen, sicherheitstechnischen/behördlichen Abklärungen, und durch die möglichst behinderungsfreie Koordination der Baumaßnahmen im Hinblick auf die laufenden Umschlagsprozesse des Terminals auf den angrenzenden Flächen. Sowie durch das Beauftragungs-/Bestellwesen und die anschließenden Abnahmen der verschiedensten Gewerke.

Die Außenfassade der BWS wurde letztlich layouttechnisch bearbeitet und mit einer Beschriftung, den Logos der Verbundprojektpartner, sowie einem Förderhinweis des BMU versehen.



**Abbildung 18:** Ansicht der BWS von der Kaiseite her

### AP 2.3: Softwareseitige Einbindung Batterieumschaltstation (GPT, HHLA)

Um im Rahmen des Förderprojektes einen vollautomatischen Batterieumschalt umzusetzen, müssen die folgenden Softwaresysteme mit einander Kommunizieren:

- Terminalleitsteuerung (TLS)
- Übergeordnetes AGV-Management-System (AGV-MS)
- AGV-Steuerung (Navimatic)
- Steuerung der Batterieumschaltstation (BWS-Steuerung)
- Ladegerätsteuerung
- Zugangskontrolle Automatikbereich (ZKA)

Bezüglich des Batterieumschalt bildet das AGV-MS das zentrale Steuerungselement, sodass außerdem die folgenden Softwareschnittstellen vorhanden sind:

- AGV-MS ↔ TLS
- AGV-MS ↔ Navimatic (Drahtlos)
- AGV-MS ↔ BWS-Steuerung
- AGV-MS ↔ ZKA
- BWS-Steuerung ↔ Ladegerätsteuerung

Der Ablauf des vollautomatischen Batterieumschalt und die erforderlichen Funktionen der Softwaresysteme wurden von Gottwald und CTA ausgearbeitet und in einem Fachkonzept dokumentiert. Darüber hinaus existiert zu jeder Softwareschnittstelle eine detaillierte Beschreibung, die entsprechend überarbeitet bzw. neu erstellt wurde.

Die Erweiterung der Schnittstelle zwischen dem Terminal-Operating-System (TLS) und dem AGV-Managementsystem war eine zentrale Aufgabe. Ohne diese Änderung hätten die B-

AGV nicht durch die TLS mit dem Batteriewechsel beauftragt werden können. Die Programmierung des AGV-MS erfolgte gemäß der genehmigten Umwidmung durch Gottwalds Tochterfirma TBA B.V., Delft (NL). Nach erfolgreichen Einzel- und Systemtests sowohl bei TBA als auch bei CTA konnte das System erfolgreich installiert werden.

Die Schnittstellenabsprache und die Änderung der TLS und der ZKA erforderten den Einsatz von Programmierern und Software-Testern des HHLA-Zentralbereichs Informationssysteme.

Die folgenden Zeilen und das anschließende Schaubild verdeutlichen den großen IT-technischen Aufwand der betrieben werden musste, um diese sechs Softwares bei laufendem Betrieb des CTA nahezu unterbrechungsfrei in Betrieb zu nehmen. Diese konzeptionellen und koordinierenden Tätigkeiten wurden im AP 2.3 durch CTA-Personal erbracht. Unterstützend wirkte der HHLA-Zentralbereich-Informationssysteme bei der Modifikation der TLS sowie insbesondere bei den umfangreichen Softwaretests mit.

Begonnen wurde die Anpassung mit der Änderung der Navigationssoftware für die B-AGV, wobei eine neue Layoutdatei erstellt und eingespielt wurde, da die Batteriewechselstation außerhalb der bisherigen AGV-Fläche aufgestellt werden sollte. Die B-AGV mussten also in der Lage sein, die Koordinaten der Batteriewechselstation zu interpretieren.

Es folgte dann die Umstellung des AGV-MS auf die Version 1-3-10 mit dem entsprechenden Grafikclient. In diese Version des AGV-MS wurde die B-AGV-Funktionalität integriert. D.h. das AGV-MS konnte von diesem Release an B-AGV von dieselbetriebenen AGV unterscheiden. Die Unterscheidung bestand aber lediglich in der Unterscheidung der Tankstatus von B-AGV und dieselbetriebenen AGV. Die B-AGV wurden bei leerer Batterie in eine Querspur (Pufferspur) gefahren und mussten von dort aus ausgeschleust und zunächst manuell aufgeladen werden, da die BWS zu diesem Zeitpunkt noch nicht in Betrieb war. Der automatische Batteriewechselvorgang war noch nicht Bestandteil dieses Releases. Das neue AGV-Layout (mit BWS), welches den B-AGV zu diesem Zeitpunkt schon bekannt war, war dem AGV-MS zu diesem Zeitpunkt noch unbekannt und konnte noch nicht automatisch angefahren werden.

Das zu diesem Zeitpunkt verwendete TLS-Release namens „Volksdorf“ hatte noch keinerlei B-AGV-Funktionalität integriert, so dass die Verwaltung der B-AGV ausschließlich über das AGV-MS vorgenommen werden musste.

Erst im TLS-Release „Winterhude“ war die B-AGV Funktionalität enthalten – und somit die Funktionalität Batterien automatisch wechseln zu können und damit das neue AGV-Layout zu befahren. Da die Batteriewechselstation nicht auf der bis dahin gültigen AGV-Fläche stand, musste eine Layoutanpassung vorgenommen werden. In das AGV-MS-Release 1-3-10 wurde deshalb ein Parameter integriert, der das Umschalten von einem AGV-Layout auf das andere bewirkte. Das AGV-Layout für das AGV-MS und die TLS muss systemisch stets identisch sein, daher wurde während des Releasewechsels der TLS von „Volksdorf“ nach „Winterhude“ zeitgleich ein AGV-MS Neustart durchgeführt, bei dem der beschriebene Parameter umgeschaltet wurde. Allen beteiligten Systemen war ab diesem Zeitpunkt das neue AGV-Layout bekannt.

Damit das AGV-MS aber auch die automatischen Batteriewechsel für die B-AGV veranlassen kann, wurde ein weiterer AGV-MS-Releasewechsel auf die Version 1-3-11 nötig.

Die Einfahrt in die Wechselstation ist mit einer Schranke gesichert, die es zuvor nicht im System gab. Außerdem hat sich durch die Batteriewechselstation die AGV-Fläche vergrößert. Diese beiden Neuerungen haben es notwendig gemacht, auch die ZKA den neuen Gegebenheiten anzupassen. AGV-MS und ZKA wirken hierbei zusammen. D.h. jede Änderung an Toren zur AGV-Fläche zieht eine Änderung in der ZKA nach sich und umgekehrt. Beide Systeme müssen in diesem Punkt übereinstimmen. Aus dieser Situation folgte, dass die ZKA und das AGV-MS zeitgleich gewechselt werden mussten. Zeitgleich zum AGV-MS-Release 1-3-11 musste auch der Grafikclient ausgetauscht werden. Dies wird grundsätzlich bei jedem Releasewechsel durchgeführt, ist aber nicht immer notwendig. Hier

war es notwendig, da die Batteriewechselstation mit ihren Funktionen für den Operator sichtbar gemacht werden musste, um eine Bedienung über den Leitstand zu gewährleisten.

Erst jetzt war es möglich B-AGV in die Batteriewechselstation zu fahren. Der Batteriewechsel konnte noch nicht automatisch stattfinden, da in einem weiteren Schritt erst noch die Software der Batteriewechselstation an das AGV-MS angeschlossen werden musste.

Der 24h-Betrieb des CTA erfordert es, dass für jede eingespielte Software ein Fallback-Plan vorliegen muss. D.h. sollte ein Fehler in einer Software auftreten, muss die Vorgängerversion wieder eingespielt werden können. Da nun das AGV-MS-Release 1-3-11 und die ZKA zusammen eingespielt wurden, hätte das bedeutet, bei einem Fehler in einer Software beide Systeme auszutauschen. Ein ZKA-Releasewechsel ist jedoch sehr aufwendig und kostet sehr viel Zeit, ist andererseits generell aber auch unwahrscheinlicher, da das System wenig Komplexität aufweist. Das AGV-MS ist ein extrem komplexes System in dem die Fehlerwahrscheinlichkeit höher ist, ein Releasewechsel aber nicht sehr zeitaufwendig. Das Ziel war es also, bei einem möglichen nötigen Rückfall des AGV-MS die ZKA nicht austauschen zu müssen. Dafür musste noch ein AGV-MS-Release 1-3-10 bereitgestellt werden, die mit der neuen ZKA kommunizieren konnte. Bei einem Rückfall er TLS hätte ebenfalls das AGV-MS inklusive Grafikclient auf die Version 1-3-10 mit dem Parameter für „Volkisdorf“ zurückfallen müssen. In diesem Fall hätte die ZKA ebenfalls zurückfallen müssen. Da dieser Rückfall mit sehr großem Aufwand verbunden gewesen wäre, wurden die TLS „Winterhude“ ausgiebig live getestet, bevor die anderen Systeme eingespielt wurden.

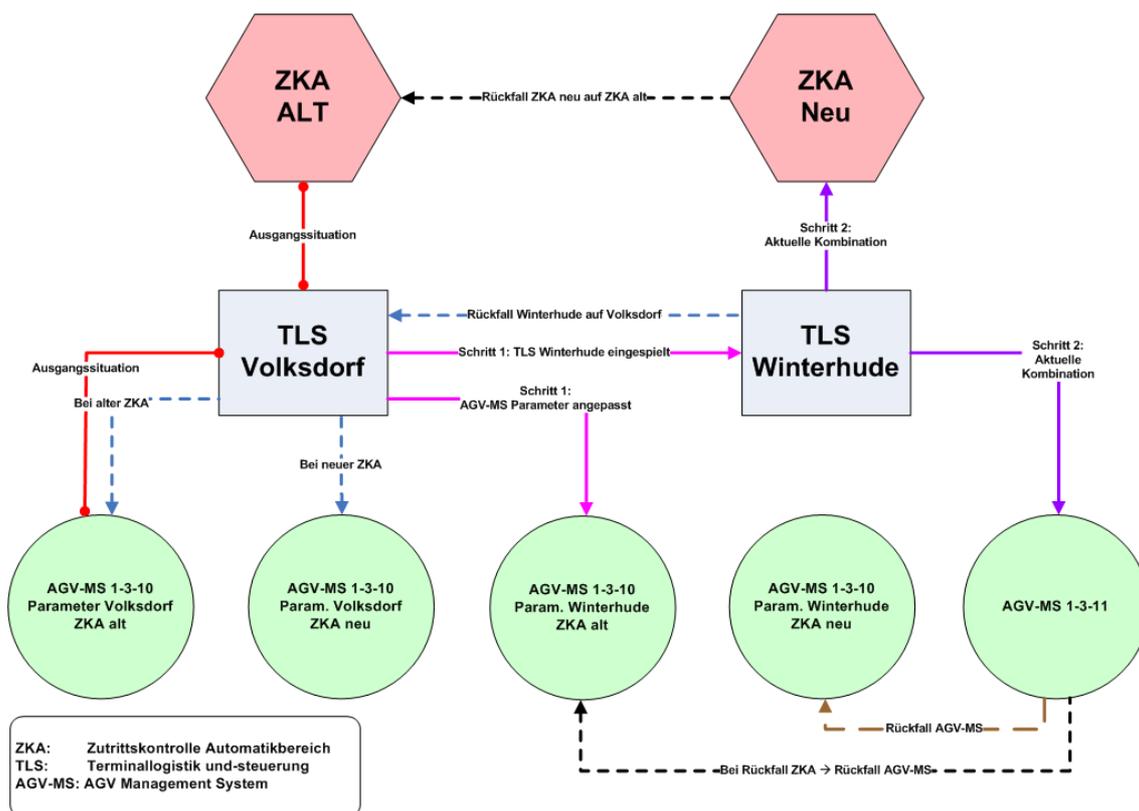


Abbildung 19: Releaseeinspielung CTA

#### AP 2.4: Aufbau und Inbetriebnahme (GPT, HHLA)

Der Aufbau der Batteriewechselstation wurde in enger Zusammenarbeit mit CTA und dem Lieferanten der Teilsysteme Batteriemaniplator und Batterieladeregale abgestimmt und durchgeführt. Die wesentlichen Arbeitsschritte waren die folgenden:

- Vermessung der Baustelle und Erstellen der Betonfundamente (CTA)
- Montage der Einhausung ohne Dach (CTA)

- Montage des Batterielageregal und des Batteriemaniplators (GPT)
- Fertigstellung der Einhausung (CTA)
- Elektrischer Anschluss (CTA, GPT)
- Montage Sicherheitszaun, Schutztür und Schranke (CTA)
- Aufbau des Ladecontainers und Anschluss der Ladegeräte an das Batterieladeregal (CTA)



**Abbildung 20:** Baustellenarbeiten Batteriewechselstation

Nachdem der Aufbau der Batteriewechselstation abgeschlossen war, erfolgten zunächst die Inbetriebnahme und der Test der Teilsysteme. Dabei wurden die einzelnen Regalpositionen des Regalbediengeräts programmiert, die Sensorreferenzmarken am Fahrzeug ausgerichtet und die Feinpositionen bei Batteriewechselprozedur eingelernt. Weiterhin wurden die Zentrierung und die Kontaktierungen der Wechselbatterien im Zusammenspiel mit dem Regalbediengerät getestet. Die Erprobung des Gesamtsystems fand im Rahmen von AP 4.3 statt.



**Abbildung 21:** Batteriewechselstation

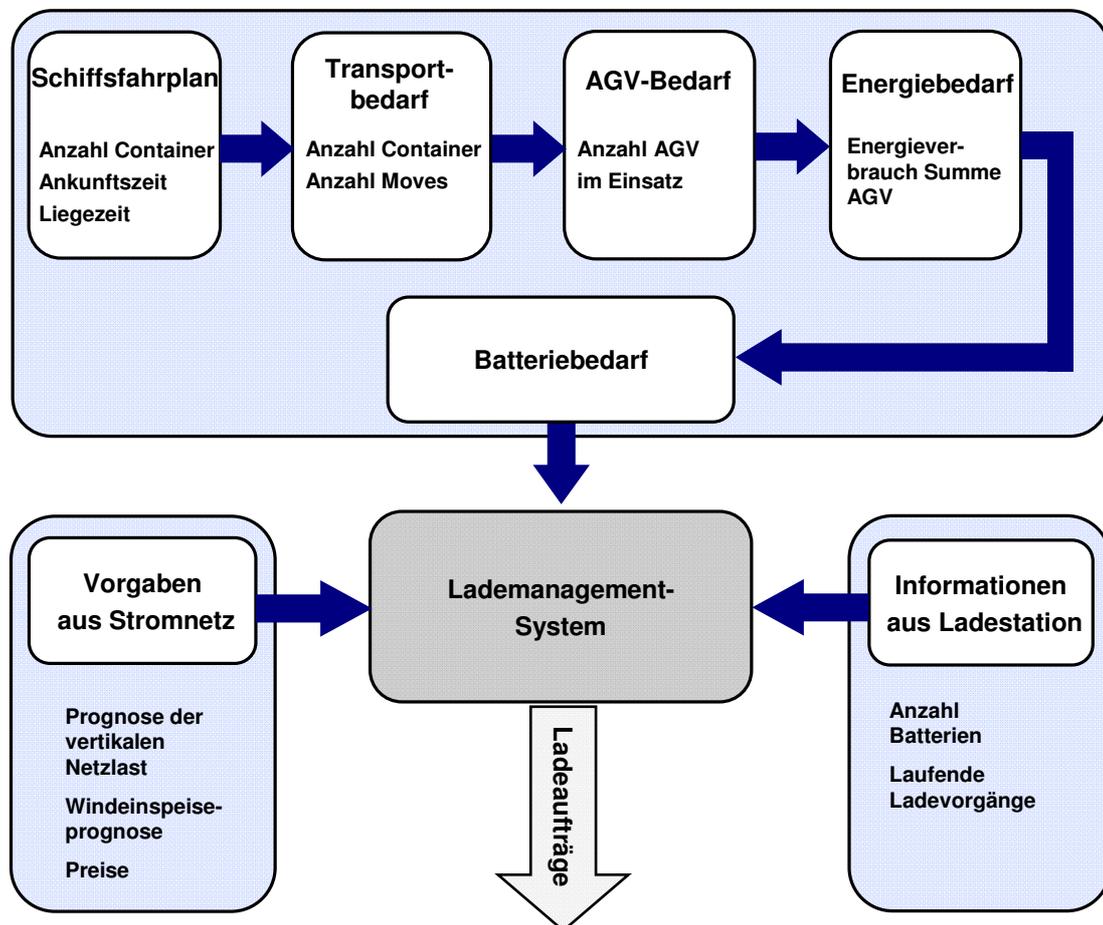
Aus den Beschreibungen zu den APs 2.2 und 2.3 geht bereits das Vorgehen und der Aufwand bei Aufbau und die anschließende Inbetriebnahme in Bezug auf viele Anlagenteile und die dazugehörige Software hervor. Das auf den Verbundpartner CTA entfallende Budget dieses Arbeitspakets war verhältnismäßig klein. Auch hier entfielen auf CTA und die HHCT-Ingenieure insbesondere Koordinationsleistungen, wie z.B. die Koordination der sicherheitstechnischen Abnahme vor der eigentlichen Inbetriebnahme durch eine zugelassene Überwachungsstelle (TÜV Nord). Ferner wurde Unterstützung bei der Inbetriebnahme des Regalbediengerätes geleistet. Zudem hat SCA sich im Hinblick auf den 24-h-Entstörungsdienst in die Technik der Batteriewechselstation eingearbeitet (Schulungsaufwand).

### 3.3 APG 3: Ladestrategien – Gesteuertes Laden

#### AP 3.1: Modellerstellung, Szenarienanalyse und Vergleich mit realen Daten (GPT, ifeu)

Für den Entwurf einer Ladestrategie müssen zahlreiche Eingangsgrößen berücksichtigt werden. Ein wichtiger Parameter ist der nachfrageseitige Bedarf zur Bereitstellung der Batterien zu bestimmten Zeiten. Die exakten Zeitpunkte für nötige Batteriewechsel können aus dem gegebenen Schiffsfahrplan ermittelt werden, indem der Containertransportbedarf eines ganzen Schiffes auf die Liegezeit umgelegt wird. Zusätzlich zu den Bedingungen der Nachfrageseite gilt es, die Vorgaben aus dem Stromnetz zu verarbeiten. Es kommen für die Anpassung der Ladestrategie verschiedene Netzdaten in Frage. In erster Linie sind dies die vertikale Netzlast und die Prognose der Windenergieeinspeisung.

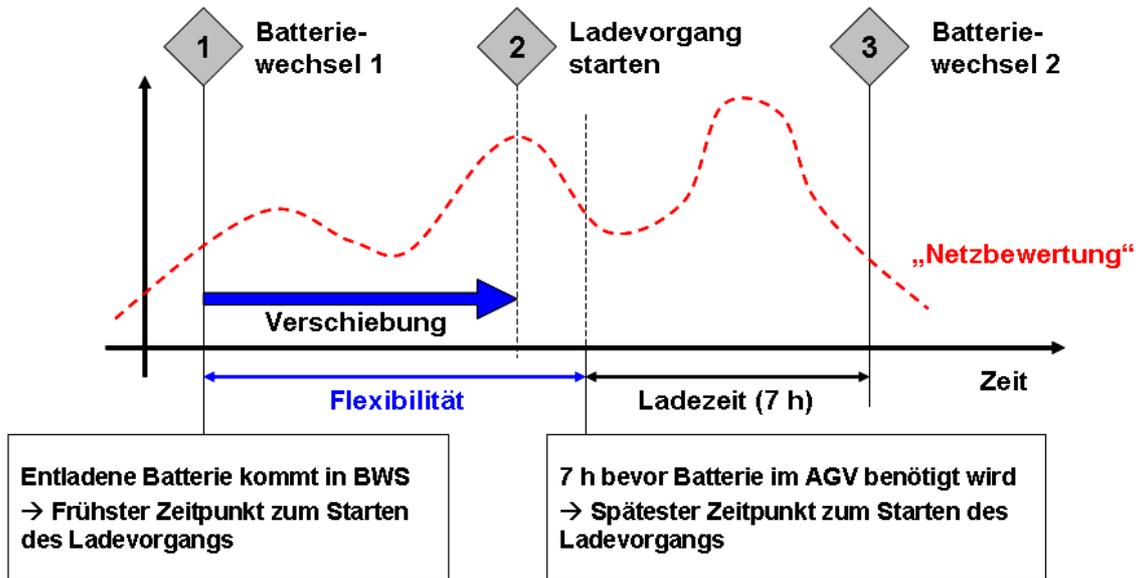
Zentraler Aspekt der untersuchten Ladestrategie, ist die Kombination der Vorgaben und Randbedingungen aus Ladestation, Energieangebot und Batteriebedarf in einem Lademanagementsystem zur Ermittlung der richtigen Ladezeitpunkte bzw. Ladezeiträume. Insbesondere wird versucht, die Ladevorgänge der Batterien so zu steuern, dass vorrangig Strom aus erneuerbaren Energiequellen genutzt werden kann, ohne dabei den Terminalbetrieb einzuschränken.



**Abbildung 22:** Struktur Lademanagement – Gesteuertes Laden

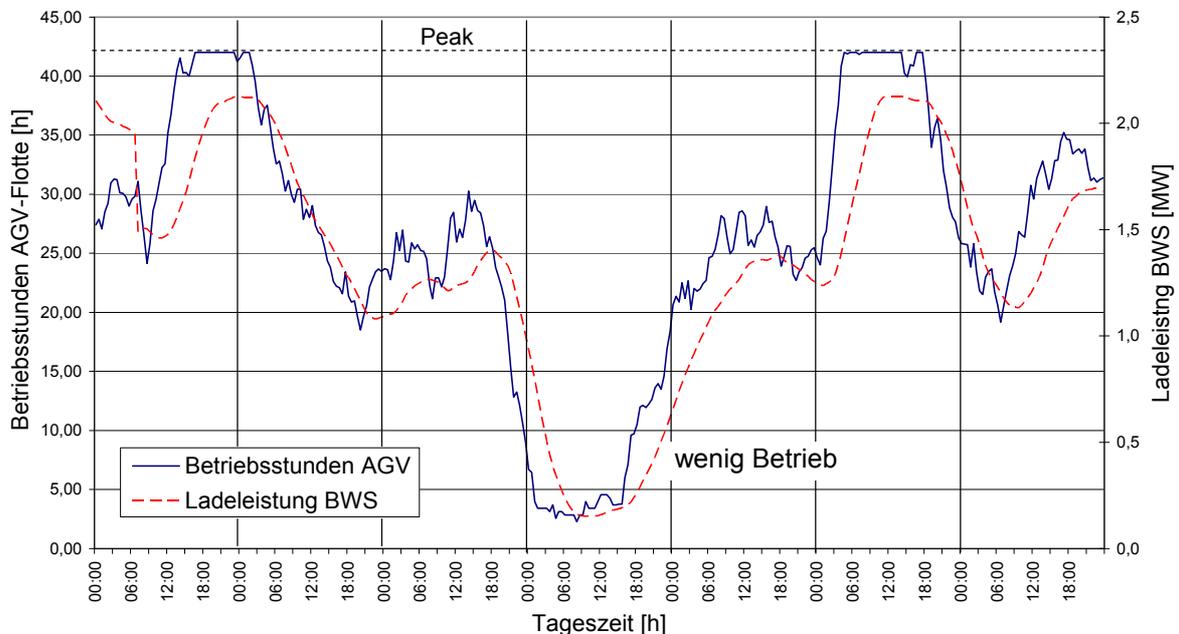
Im Rahmen des Projekts wurde ein Modell zum gesteuerten Laden aufgebaut, das optimierte Ladezeitpunkte bei verschiedenen Terminalauslastungen, Netzsituationen und flexibler Batterieanzahl berechnen kann. Das Modell wurde in einer Tabellenkalkulation umgesetzt. Ziel ist es den Energiebedarf zu einem größtmöglichen Teil aus regenerativen Energien, insbesondere Windenergie decken zu können. Dazu werden die Ladevorgänge nach Möglichkeit in Zeiträume verschoben, zu denen die eingespeiste Leistung von Windenergie besonders hoch ist.

Des Weiteren können Vorgaben aus dem Stromnetz in das Modell eingelesen werden, so dass die Ladestrategien für eine große Flotte von batteriebetriebenen AGV so optimiert werden können.



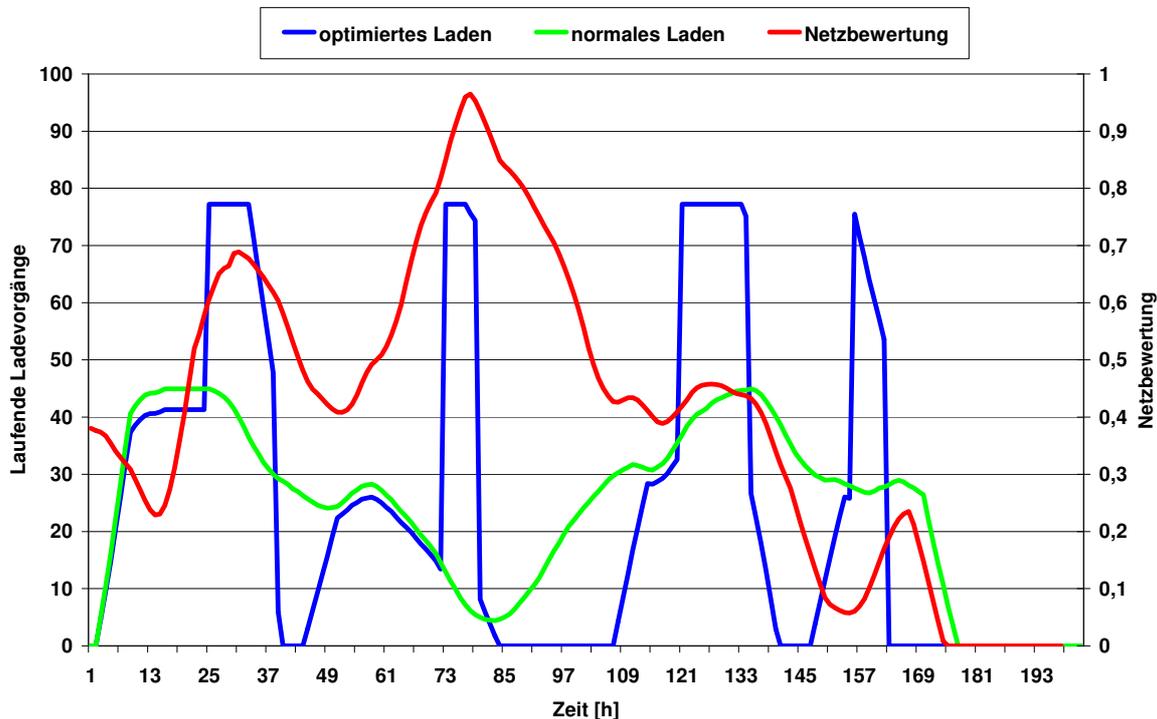
**Abbildung 23:** Ablauf des gesteuerten Ladens

Um die Funktion des Lademodells zu überprüfen, wurde eine beispielhafte einwöchige Verteilung der Betriebsstunden einer AGV-Flotte mit 84 B-AGV und den dazugehörigen Energiebedarf der Ladestation erstellt. Die Verteilung passt zu den Randbedingungen eines realen Terminals. Es werden zwei Peak-Situationen abgebildet, bei denen alle AGV die maximalen Betriebsstunden verrichten. Weiterhin wird ein Tag abgebildet, an dem sehr wenig Terminalbetrieb stattfindet. Der Ladeleistung in **Abbildung 24** liegt eine noch nicht optimierte Ladestrategie zu Grunde.



**Abbildung 24:** Beispielhafte wöchentliche Verteilung der Betriebsstunden einer AGV-Flotte

Der Verteilung der Betriebsstunden wurden verschiedene Netzbewertungskurven gegenübergestellt, die vom ifeu aus realen Windenergie-Szenarien generiert wurden. Die Auswirkungen des gesteuerten Ladens sind in folgendem Diagramm dargestellt:



**Abbildung 25:** Beispiel zum optimierten Laden (84 AGV, 168 Wechselbatterien)

Während die Verteilung der nicht-optimierten Ladevorgänge ausschließlich der Betriebsstundenverlauf der AGV folgt, finden die optimierten Ladevorgänge vermehrt zu Zeiten einer hohen Netzbewertung statt. Da in dem Modell der Terminalbetrieb höchste Priorität hat, gibt es jedoch auch Zeiträume, wie z.B. der Bereich zwischen 49 h und 73 h, in denen sich die optimierte Ladekurve nicht von dem normalen Laden abgrenzen kann. Derzeit ist der Algorithmus zur Optimierung der Ladevorgänge noch vergleichsweise einfach gehalten. Es wird davon ausgegangen, dass durch verbesserte Optimierungsalgorithmen und verbesserte Modelle, die Verteilung der Ladevorgänge unter gleichen Randbedingungen noch weiter verbessert werden kann. Eine ökologische Bewertung des gesteuerten Ladens erfolgte im Rahmen der Arbeitspaketgruppe 7.

Zur technischen Umsetzung der erarbeiteten Ladestrategien wurden mit der Fa. Vattenfall, die als Unterauftragnehmer des ifeu in das Projekt eingebunden sind, die erforderliche Schnittstelle zwischen den Batterieladegeräten und dem Gerät für das gesteuerte Laden spezifiziert und umgesetzt.

Mit den daraus entstandenen Steuergeräten können die beiden Ladegeräte separat über ein UMTS-Signal von einer externen Stelle eingeschaltet werden, so dass die Zeitpunkte für den Beginn des Ladevorgangs an die Verfügbarkeit von Strom aus regenerativen Energiequellen angepasst werden. Die beiden Steuergeräte sind bereits in die Ladestation integriert und getestet worden, siehe Abbildung 27. Die Signale zum Einschalten der Ladegeräte werden durch ein System von Vattenfall generiert.



Abbildung 26: Verzögertes Einschalten mit Vattenfall-Steuergerät



Abbildung 27: Steuergeräte Vattenfall

### 3.4 APG 4: Langzeittest

Um die Vorteile des neuen Antriebssystems nachweisen zu können, war im Projekt ein mehrmonatiger Feldversuch auf dem Container-Terminal Altenwerder in Hamburg vorgesehen. Das Ziel des Feldversuchs war, die neue Technologie unter realen Bedingungen zu testen und die verabschiedeten Zielgrößen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des Systems zu verifizieren. Die einzelnen Arbeitspakete der APG 4 wurden in Abstimmung durch die Projektpartner CTA, ika und Gottwald bearbeitet.

Für den Projektpartner GPT wurden für die Erfassung der im Feldversuch aufzunehmenden Fahrzeugdaten zwei Daten-Logger angeschafft. Die Durchführung des Feldversuchs wurde in Form einer F&E-Fremdleistung durch einen Service-Mitarbeiter der Schwesterfirma Demag Cranes & Components von GPT intensiv unterstützt. Der Mitarbeiter ist bei der Niederlassung Nord eingesetzt und konnte daher auch kurzfristig bei Störungen der Fahrzeuge und der BWS aktiv werden. Als sonstige unmittelbare Vorhabenskosten entfiel auf CTA das Budget der Stromkosten für zertifizierten Ökostrom direkt in AP 4.

#### AP 4.1: Versuchsprogramm (GPT, HHLA)

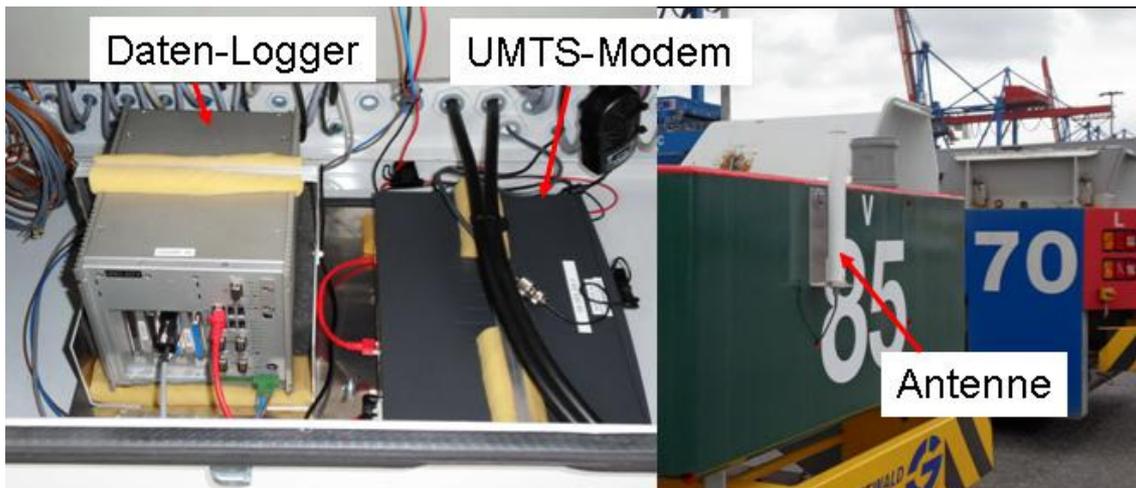
Als Vorbereitung für den Langzeittest wurde von GPT in enger Zusammenarbeit mit CTA ein detaillierter Ablaufplan erstellt, in dem der Aufbau, die Inbetriebnahme und die Tests der einzelnen Teilsysteme Fahrzeug, Batteriewechselstation und Software festgelegt wurden.

Die Erfassung der umfangreichen Daten aus dem Feldversuch erfolgt in vielen verschiedenen Teilen des Systems „Batterie-AGV“ und soll im Folgenden kurz erläutert werden.

Im AGV-Management-System, das die Fahraufträge an die beiden Batterie-AGV vergibt, werden die Einsatzzeiten der gesamten AGV-Flotte tagesgenau erfasst und protokolliert. Aus diesen Daten können wichtige logistische Größen wie der Fahranteil oder die Auslastung des Terminals abgeleitet werden. Darüber hinaus kann anhand dieser Daten ein Vergleich des Einsatzes von Batterie-AGV und dieselbetriebenen Fahrzeugen gezogen werden.

In der Fahrzeugsteuerung werden die Betriebsstunden von diversen Komponenten des Fahrzeugs mitgeschrieben, z.B. Fahrmotore, Hydraulikpumpe. Diese Werte können mit den Daten des AGV-Management-Systems gegenübergestellt werden, um etwa die Fahrstunden für einen gewissen Zeitraum zu überprüfen.

Es wurden in beiden Prototypen Daten-Logger installiert, mit denen eine Vielzahl von fahrzeugtechnischen Messgrößen mit einer Auflösung von 10 Hz erfasst und über einen Zeitraum von etwa 17 h aufgezeichnet werden können, siehe **Abbildung 28**. Um die erforderlichen Messgrößen aufnehmen zu können, wurde die Fahrzeugsteuerung und die Navigationssoftware modifiziert. Das Auslesen der Daten kann kabellos über einen angeschlossenen UMTS-Router erfolgen, so dass die Fahrzeuge zum Auslesen der Messdaten nicht aus dem aktiven Betrieb ausgeschleust werden müssen. Die hohe Auflösung der Messdaten von 10 Hz resultiert in einer sehr großen Datenmenge. Daher werden die Daten für die spätere Auswertung und Darstellung in Zeitabschnitte von 30 min herunter gebrochen.



**Abbildung 28:** Daten-Logger

Die fahrzeugspezifischen Daten bilden die Basis für die Validierung des Simulationsmodells des ika. Die Messwerte beschreiben sowohl mechanische, hydraulische und elektrische Größen sowie Zeit- und Temperaturangaben.

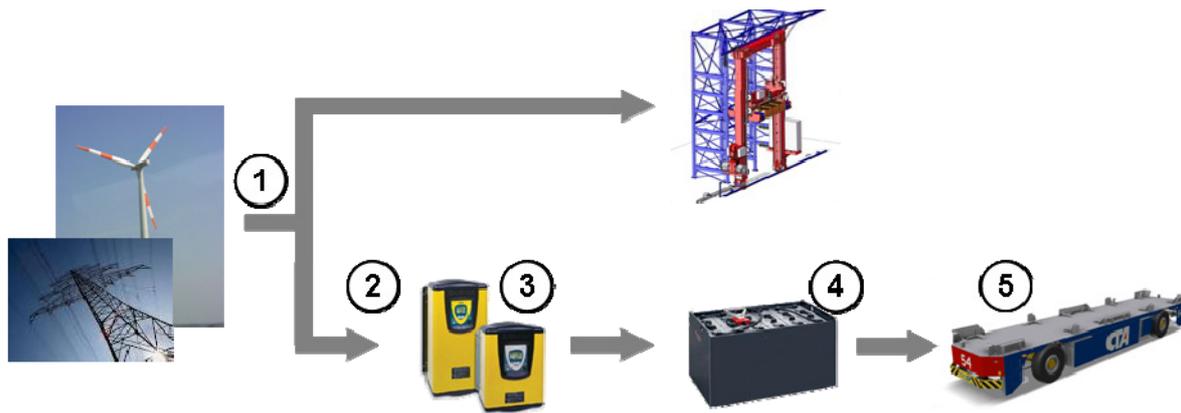
Eine weitere wichtige Datenquelle stellt die Batteriewechsel- und -ladestation dar. In der Steuerung des Regalbediengeräts werden alle Batteriewechsel mit Zeitpunkt und Wechseldauer sowie der Fahrzeug- und Batterienummer erfasst. Darüber hinaus werden der Beginn und das Ende des anschließenden Ladevorgangs protokolliert.

In den Mehrfachladegeräten werden die Ladeschlussdaten zu den Ladevorgängen aller Batterien gespeichert. Zu den Ladeschlussdaten zählen die Ladezeit, die eingeladene Kapazität sowie etwaige Fehlermeldungen während des Ladevorgangs. Für eine Bewertung des Energieeinsatzes sind die Ladegeräte zusätzlich mit einem Energiezähler ausgerüstet, mit dem die aus dem Stromnetz entnommene Energie ermittelt werden kann.

Als zusätzliche Informationsquelle ist auf den 460 Ah Batterien jeweils ein Batterie-Controller installiert. Der Batterie-Controller ist ein spezieller Daten-Logger für die Batteriedaten, der Daten sowohl beim Lade- als auch beim Entladevorgang speichert.

Die Beschreibung der verschiedenen Teilsysteme für die Erfassung der Messwerte aus dem Feldversuch zeigt, dass einige Messgrößen an mehr als einem Punkt erfasst werden können. Dies bietet die Möglichkeit, die ermittelten Messdaten abzugleichen. Weiterhin ist es möglich, die Messdaten zu synchronisieren, da der Aufzeichnungszeitraum bzw. die logischen Einheiten bei den einzelnen Teilsystemen nicht die gleichen sind. Das Zusammenfügen der Messdaten aus den einzelnen Teilsystemen und die Aufbereitung für eine ganzheitliche Auswertung ist die Hauptaufgabe der anschließenden Arbeitspunkte.

Die Aufnahme von Messgrößen in unterschiedlichen Teilsystemen bietet auch die Möglichkeit, Wirkungsgrade der eingesetzten Komponenten im Rahmen des Feldversuchs zu ermitteln. In der Abbildung 29 sind die 5 Messpunkte für den Energiebedarf des AGV-Systems dargestellt. Die einzelnen Messpunkte sind der Zählpunkt des Energielieferanten (1), die Energiezähler der Ladegeräte (2), die Ladeschlussdatenspeicherung (3), die Batterie-Controller (4) sowie der fahrzeugseitige Daten-Logger (5). Die einzelnen Wirkungsgrade des gesamten Systems werden in AP 4.3 hergeleitet.



**Abbildung 29:** Messpunkte Energiebedarfe

Die auf CTA in diesem AP entfallenden Aufgaben waren insbesondere vorbereitender, organisatorischer Art. Dazu gehörten auch die Schulungen, speziell der Mitarbeiter des Leitstandes, um eine sichere Bedienung der Systeme und Systemoberflächen im 24-h-Betrieb sicherzustellen. Beispielsweise wurden auch Meldekettens für eventuell auftretende Fehlerfälle eingerichtet. Zudem erfolgten die notwendigen arbeitssicherheitstechnischen Vorkehrungen mit den Sicherheitsfachkräften und dem Betriebsrat.

Begonnen wurde das Versuchsprogramm zunächst mit der Arbeitsweise der B-AGV noch ohne BWS. Hierzu waren organisatorische Maßnahmen vorzubereiten, die ein rechtzeitiges Ausschleusen und wieder Einschleusen der Fahrzeuge gewährleisten. Für den späteren Automatikbetrieb mit BWS waren wiederum andere organisatorische Abläufe einzurichten. Auch technische Vorbereitungen für die Ingenieure der HHCT wurden z.B. im Hinblick auf ein regelmäßiges Fehlermonitoring getroffen. Nicht zuletzt war die Integration in den Entstördienst auf Seiten von SCA sicherzustellen (Handlungsanweisungen), nebst Personaleinsatzplanung und der Planung von Werkstattressourcen.

#### **AP 4.2: Erprobung Fahrzeugtechnik (GPT, HHLA)**

Nach einer Inbetriebnahme auf dem Testgelände von CTA, die durch Mitarbeiter von GPT erfolgte, wurden die Fahrzeuge in Form eines Probebetriebs in den regulären Automatikbetrieb auf dem Container-Terminal Altenwerder mit eingebunden. Bis zum Ende des Projekts wurden von jedem der Fahrzeuge fast 1.000 Betriebsstunden absolviert.

##### **Terminalbetrieb**

Dem Projektpartner CTA oblag in diesem AP die Einbindung der Batterie-AGV in den realen Terminalbetrieb. Also die Koordination aller dafür notwendigen Stellen und Systeme. Das folgende Foto zeigt das Batterie-AGV 85 bei seiner ersten Einschleusung in den Automatikbetrieb.



**Abbildung 30:** Batterie-AGV 85 auf der Testfläche

Insbesondere in den ersten Wochen war eine intensive Begleitung der Fahrzeuge durch die Mitarbeiter von CTA notwendig, da diese zunächst manuell nachgeladen werden mussten, sobald die Batterie entladen war. Die BWS war zu diesem Zeitpunkt noch nicht aktiv. Auf der folgenden Abbildung ist das Batterie-AGV 86 neben dem Ladegeräte-Container auf dem Werkstatavorplatz zu sehen. Das manuelle Laden beinhaltet das Verbinden der Ladestecker zwischen den Ladegeräten und den Batterien im Fahrzeug, sowie dem anschließenden Lösen dieser Verbindungen. Diese Tätigkeiten wurden vom Fachpersonal der SCA GmbH vorgenommen. Genau wie das Aus- und Einschleusen in den Automatikbereich. Der Ladecontainer stammt aus einem vorangegangenen Projekt und wurde durch GPT bereitgestellt.



**Abbildung 31:** Ladevorgang - Batterie im Fahrzeug

Zuvor waren intensive Schulungen für die beteiligten Mitarbeiter, auch im Hinblick auf ein eventuelles Gefährdungspotential durch die Batterietechnik und die damit verbundenen hohen Spannung, notwendig. SCA unterstützte ferner bei Sichtungen und Wartungen der Fahrzeuge.

CTA erprobte auch das Bergen eines ausgefallenen Batterie-AGV, was auf Grund des höheren Fahrzeuggewichtes eine besondere Vorsicht beim Verwenden des Reach-Stackers erforderte und weitere erhöhte Anforderungen an den Bergungsvorgang stellte.



**Abbildung 32:** Erprobung des Bergevorgang mittels Reach-Stacker

Um für alle Eventualitäten eines Echtbetriebes gerüstet zu sein, standen auch diverse Übungen für das Personal von SCA auf dem Programm, um eine Batterie in der Werkstatt ohne die Hilfe eines Regalbediengerätes aus dem Batterie-AGV auszubauen. Die entsprechende Vorrichtung wurde von GPT konstruiert und bereit gestellt. Das folgende Bild dokumentiert diese Übungsprozedur, wobei es auch hier galt, geeignete Maschinen einzusetzen.



**Abbildung 33:** Batteriewechselvorrichtung für Werkstatt

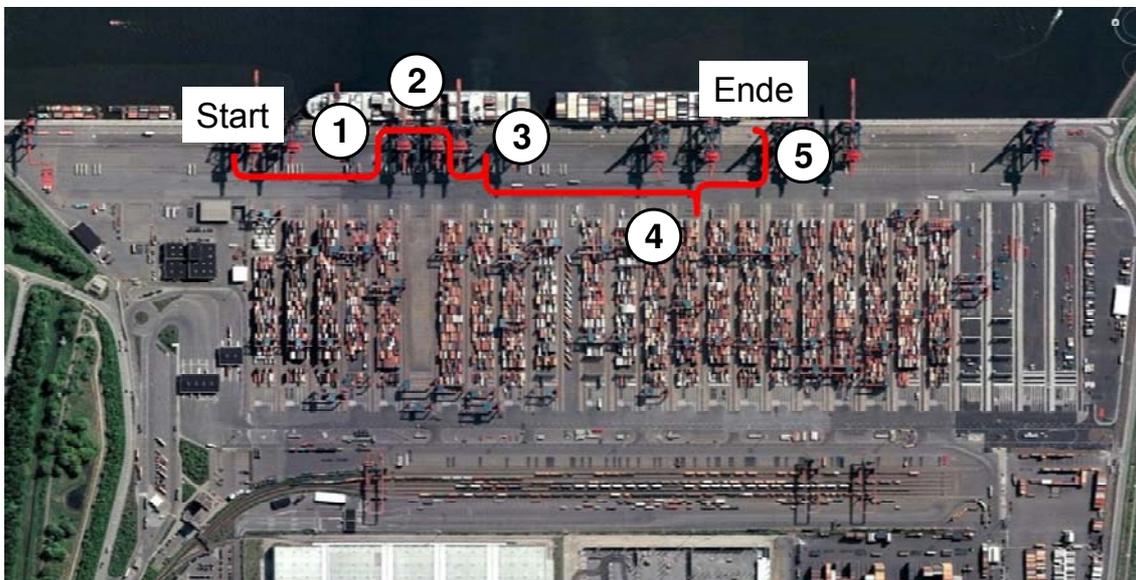
Weiterer Aufwand entstand bei den Ingenieuren der HHCT und bei CTA durch den intensiven Austausch zum technischen Stand des Projektes mit dem Verbundpartner GPT einerseits, aber auch durch die Sicherstellung der internen Kommunikation innerhalb von CTA (Information der beteiligten Mitarbeiter).

Im Folgenden werden die Auswertungen der fahrzeugtechnischen Daten, die im Laufe des Feldversuchs durch den Projektpartner GPT ermittelt worden sind, im Einzelnen dargestellt.

### Fahrzyklen

In der **Abbildung 34** ist eine Luftbildaufnahme des Container-Terminals Altenwerder dargestellt, in das ein typischer Fahrzyklus des Batterie-AGV eingefügt wurde. Der Streckenverlauf basiert auf den mit dem Datenlogger aufgenommenen Positionsdaten der Fahrzeuge. Die Strecke hat eine Länge von ca. 1 km und wurde in 30 min abgefahren.

Beim „Start“ befindet sich das Fahrzeug in einer Querspur auf einer Warteposition und ist unbeladen. Nach dem Erhalt eines Auftrags fährt das AGV über die parallel zum Kai verlaufende Hauptfahrspur in eine Querspur in der Nähe des anzufahrenden Kaikrans und wartet dort (1) zunächst, bis es unter den Kaikran fahren darf (2). An dieser Position wird das AGV mit einem 20'-Container beladen. Damit der vom Schiff gelöschte Container mit der richtigen Orientierung in den Lagerbereich eingelagert werden kann, muss das Fahrzeug zunächst noch ein Wendemanöver fahren (3), einen sogenannten „door-turn“. Anschließend fährt das AGV weiter zur Übergabeposition des Lageblocks (4), wo der Container von einem Lagerkran automatisch abgehoben und in das Blocklager eingelagert wird. Für den folgenden Auftrag bewegt sich das AGV zunächst wieder in eine Querspur auf eine Warteposition (5), bevor ein weiterer Kaikran angefahren wird. Kurz bevor die Position unter dem Kaikran erreicht wird, ist die Laufzeit von 30 min dieses Datenabschnitts beendet.



**Abbildung 34:** Ausschnitt Fahrzyklus I, Quelle Hintergrund: google maps

Als Ergänzung ist in dem Diagramm in Abbildung 35 die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Beladung für denselben Zeitabschnitt wie zuvor dargestellt und mit der entsprechenden Nummerierung versehen. Die Geschwindigkeit wird dabei nur betragsmäßig dargestellt, so dass sowohl vor als auch nach dem Wendemanöver die Geschwindigkeit einen positiven Wert aufweist. Die starken Ausschläge der roten Kurve beim Be- und Entladen des Fahrzeugs mit einem Container sind auf die Stoßbelastungen beim Aufsetzen des Spreaders, dem Lastaufnahmemittel des Krans, zurückzuführen.

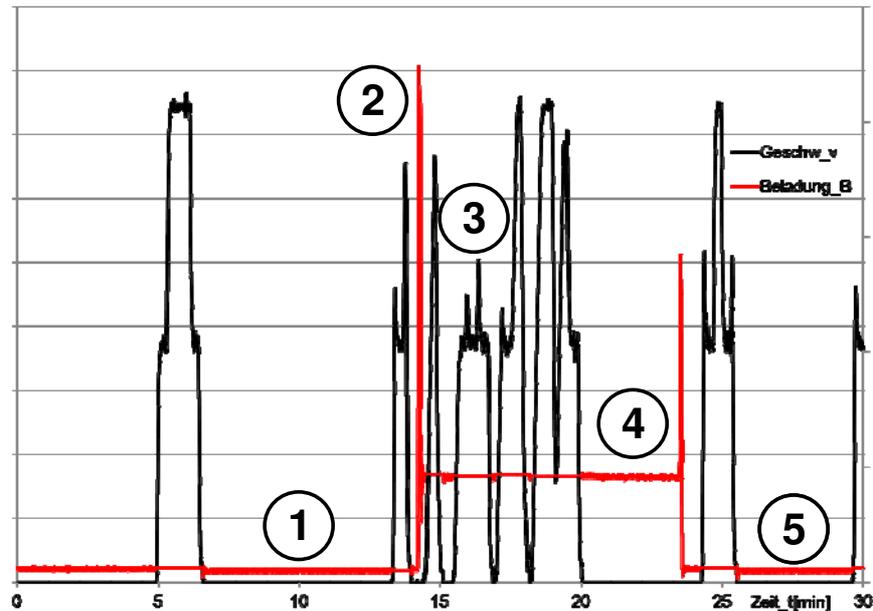


Abbildung 35: Ausschnitt Fahrzyklus II

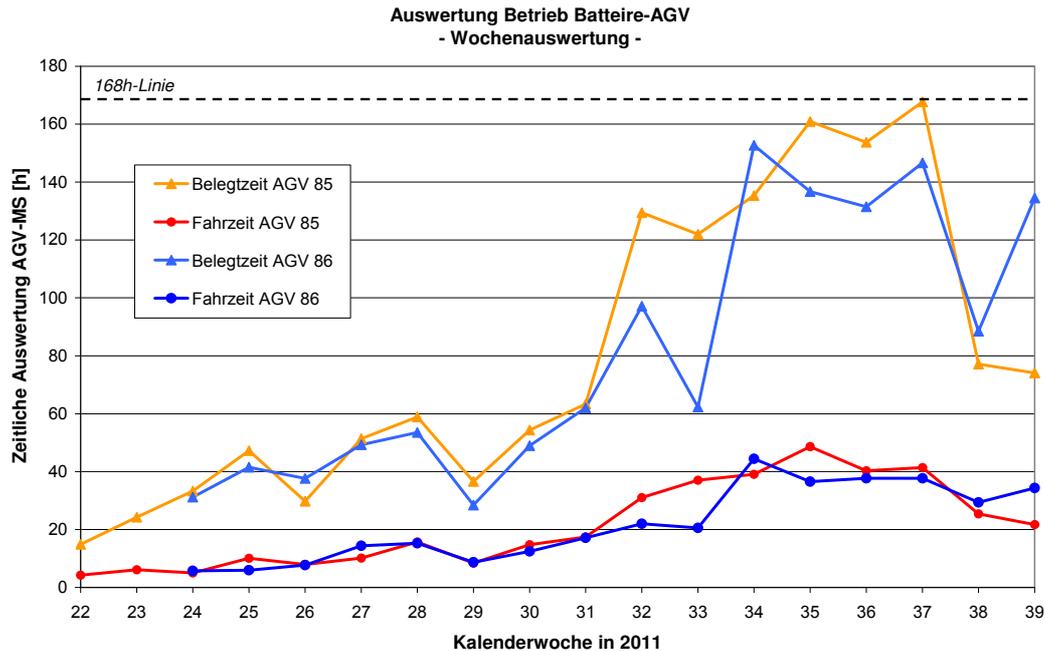
### Belegzeiten und Fahrzeiten

Der Betrieb der gesamten AGV-Flotte wird über das AGV-Managementsystem gesteuert, so dass hierüber auch die zeitliche Entwicklung der Fahrzeugeinsätze während des Feldversuchs ausgewertet werden kann.

CTA war im Rahmen der Ermittlung von Betriebsdaten damit befasst, zunächst einmal zu definieren, welche logistischen Daten überhaupt benötigt wurden. Eine wesentliche Statistik beinhaltet z.B. die durch CTA durchgeführte Ermittlung der Verhältnisse von „Belegzeiten“ zu „Nicht-Belegzeiten“ und den eigentlichen „Fahrzeiten“. Als „Belegzeit“ der AGV wird der Zeitraum definiert, in dem ein AGV mit einem Auftrag von der Terminal-Leitsteuerung belegt ist, also die Zeit zwischen Auftragserteilung und Auftragsbeendigung. Ein erteilter Auftrag wird immer direkt begonnen und es kann immer nur ein Auftrag pro Fahrzeug vergeben werden. Die „Fahrzeit“ ist die Zeit, in der sich das AGV tatsächlich bewegt, also die Räder drehen.

Dazu mussten zuerst geeignete Primär- und Sekundärstatistiken ausgewählt werden. Im Anschluss daran wurden sogenannte Reports erstellt, mit denen die Auswertungen vorgenommen wurden. Wöchentlich wurden diese Zahlen seit Mai 2011 ermittelt. Zudem erfolgten Verständigungen/Diskussionen mit GPT zur Verwendung geeigneter Betriebsstundendefinitionen der B-AGV um Vergleichbarkeiten/Übertragbarkeiten auf andere Fahrzeugtypen zu ermöglichen.

Im folgenden Diagramm sind die Entwicklungen der Beleg- und Fahrzeiten für beide Prototypen während des Feldversuchs in Abhängigkeit der Kalenderwochen dargestellt. Grundsätzlich ist eine stetige Steigerung der Fahrzeugeinsätze festzustellen, da fehlerbedingte Ausfallzeiten reduziert werden konnten. Der durchgehende Probetrieb der Fahrzeuge wurde in der KW 32 begonnen, was deutlich an den Sprüngen in den einzelnen Kurven ersichtlich ist. In den folgenden Wochen erreichen die gemessenen Belegzeiten Werte, die an die theoretisch möglichen 168 h pro Woche heranreichen. In diesen Wochen sind keine Fehler bzw. nur solche Fehler, die sehr schnell behoben werden konnten, aufgetreten. Dies ist ein deutliches Indiz für die hohe Zuverlässigkeit der Fahrzeuge und damit auch der eingesetzten Batterie- und Batteriewechseltechnologie.

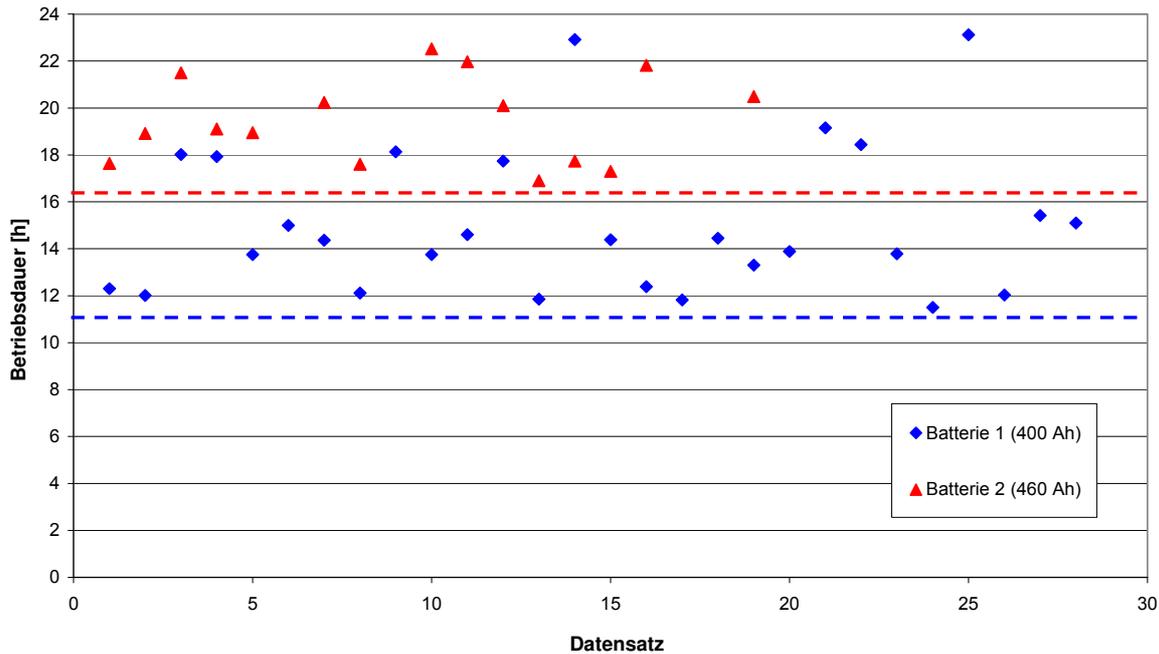


**Abbildung 36:** Entwicklung Einsatzzeiten

Die Auswertung hat gezeigt, dass der durchschnittliche Anteil der Fahrzeit an der Belegzeit 26 % beträgt. Dieser Wert hängt stark von der Auslastung des Terminals ab, liegt aber im Bereich der langjährigen Erfahrungswerte von CTA mit den dieselbetriebenen AGV. Die Zeiten für die Batteriewechselvorgänge und die damit verbunden An- und Abfahrten zur Batteriewechselstation haben keinen merklichen Einfluss auf die erreichbaren Fahranteile.

### Betriebsdauer

In dem Diagramm der **Abbildung 37** sind die Betriebsdauern der Batterie-AGV mit einer Batterieladung dargestellt, die nach Aufnahme des durchgängigen Probebetriebs erzielt worden sind. Bei der Betriebsdauer wird im Gegensatz zur Belegzeit nicht unterschieden, ob das Fahrzeug mit einem Auftrag von der Terminalleitsteuerung belegt ist oder nicht. Die Daten beruhen auf der Auswertung der Zeitpunkte der einzelnen Batteriewechsel bzw. der Zeiträume zwischen den Wechselvorgängen. Für die Darstellung wurden die Fahrten beider Fahrzeuge durchnummeriert. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass für den Feldversuch eine feste Zuordnung von Fahrzeugen und Batterien bestand. Das AGV 85 wurde ausschließlich mit den 400 Ah-Batterien, das AGV 86 mit den 460 Ah-Batterien betrieben.



**Abbildung 37:** Betriebsdauern mit einer Batterieladung

Das Diagramm beinhaltet nur Fahrzyklen bei denen eine vollständig geladene Batterie bis zur Abschaltswelle genutzt wurde. Bei einigen Fahrzyklen wurde der Batteriewechsel vorzeitig von einem Bediener angefordert. Diese Fahrzyklen sind nicht im oben stehenden Diagramm enthalten.

Die erreichbare Betriebsdauer hängt sehr stark von der tatsächlichen Auslastung des Containerterminals und des einzelnen Fahrzeugs ab. Bei einer niedrigen Auslastung verlängert sich die Betriebsdauer, da während der Stillstandzeiten fast keine Energie aus der Batterie benötigt wird. Aus diesem Grund kann das obige Diagramm so gelesen werden, dass mit beiden Batterietypen immer eine Betriebsdauer von mindestens ca. 12 h gewährleistet werden konnte. Für die Auswertung sind die Datensätze mit höherer laufender Nummer ausschlaggebend, da die Ausnutzung des Energieinhalts der Batterien während des Feldversuchs noch optimiert wurde. Die Betriebsdauer mit einer Batterie beträgt für die dargestellten Werte im Mittel ca. 17,2 h. Dieser Wert kann für eine durchschnittliche Terminalauslastung herangezogen werden und verdoppelt nahezu den geforderten Wert von 8 h Einsatzzeit bei einer Vollauslastung des Terminals. Mit den 460 Ah Batterien können sogar noch deutlich höhere Einsatzzeiten erreicht werden.

Auch gegen Ende des Feldversuchs sind die Batteriekapazitäten noch nicht vollständig ausgeschöpft, so dass für die Ausdehnung der Betriebsdauern noch weiteres Potential besteht. Dieser Aspekt wird bei der Auswertung der Batterieladedaten unter AP 4.3 noch einmal aufgegriffen.

### Auswertung Energiebedarf

Für die Ermittlung des Energiebedarfs der Fahrzeuge wurden zunächst zusammenhängende Zeitabschnitte ausgewählt, in denen weder im Fahrzeug noch in der BWS ein Fehler aufgetreten ist und immer automatisierte Batteriewechsel durchgeführt wurden. Daraufhin wurden aus den dazugehörigen Batterieladezyklen unter Berücksichtigung des Ladefaktors die im jeweiligen Zeitraum entnommenen Energiemengen der Batterien berechnet, siehe **Tabelle 3**. Die aus den Batterien entnommene Energie kann nun ins Verhältnis zur betreffenden Fahrzeit oder Belegtzeit gesetzt werden, die für dieselben Zeitabschnitte aus dem AGV-Management ermittelt worden sind.

**Tabelle 3:** Auswertung Energiebedarf AGV

Zeitabschnitt		AGV 85				AGV 86			Summe
		1	2	3	4	1	2	3	
Belegzeit	[h]	68,2	59,3	60,6	69,6	91,1	87,3	74,5	510,6
Fahrzeit	[h]	23,7	16,0	16,5	22,9	31,1	24,5	21,7	156,4
Energie aus Batterie	[kWh]	847,2	601,7	659,0	901,2	1023,8	837,5	792,8	5663,2
Stillstand	[h]	44,5	43,3	44,1	46,7	60,0	62,8	52,8	354,2
Energie Stillstand	[kWh]	44,5	43,3	44,1	46,7	60,0	62,8	52,8	354,2
Energie Fahren	[kWh]	802,7	558,4	615,0	854,4	963,8	774,7	740,1	5309,1
Leistung Fahren	[kW]	33,9	34,9	37,2	37,4	31,0	31,6	34,1	33,9
Leistung gesamt	[kW]	12,4	10,1	10,9	12,9	11,2	9,6	10,6	11,1

Daraus folgt eine Leistung für ein batterie-betriebenes AGV, gemessen an der entnommenen Energie der Batterie, für einen durchschnittlichen Fahrzustand von 33,9 kW. Die Leistungsaufnahme beim Stillstand wurde über die Daten-Logger ermittelt, diese beträgt etwa 1,0 kW. Bei einem angenommenen Fahranteil von 40 % liegt der zu erwartende Leistungsbedarf eines Batterie-AGV bei 14,2 kW und damit etwa 25 % unter dem Zielwert von 19 kW.

Der in der Tabelle angegebene Wert für die durchschnittliche ‚Leistung gesamt‘ liegt noch unter diesem Wert, da die Fahranteile in den ausgewerteten Zeitabschnitten geringer als die angenommene Verteilung waren. Tendenziell liegt der Energiebedarf des AGV 86 mit der 460 Ah-Batterie etwas niedriger, hierfür liegt derzeit noch keine eindeutige Erklärung vor.

Bei der Versuchsauswertung muss berücksichtigt werden, dass die hier betrachteten Daten aus einem Feldversuch stammen und nicht im Laborversuche erfasst wurden. Im Feldversuch sind nicht immer alle Randbedingungen bekannt bzw. zu erfassen. Als Ergebnis sind daher die ermittelten Durchschnittswerte über einen langen Zeitraum als maßgebend zu betrachten, da hier unbekannte Einflüsse in ihrer tatsächlichen Häufigkeit mit eingehen.

Die Erprobung der Fahrzeugtechnik hat gezeigt, dass die Batterie-AGV im operativen Betrieb die gleiche Umschlagsleistung erreichen wie die Fahrzeuge mit Dieselmotor. Die eingesetzte Technologie läuft sehr stabil und die Fahrzeuge haben nur sehr wenige Fehlermeldungen. Die gemessene Einsatzzeit weit über den geforderten 8 h und die Batteriekapazitäten werden noch nicht vollständig ausgeschöpft. Die langen Einsatzzeiten begründen sich vor allem am geringen Energieverbrauch der Fahrzeuge, der für den Vergleichszyklus mit 40% Fahranteil nur 14,2 kWh pro Stunde beträgt. Der geringe Energieverbrauch ist auch darauf zurückzuführen, dass entgegen der ursprünglichen Annahme Energie beim Bremsen rekuperiert werden kann, siehe AP 4.4.

#### **AP 4.3: Erprobung Batteriewechselstation (GPT, HHLA)**

Die Erprobung der BWS im Feldversuch wurde anteilig von den Projektpartnern CTA und GPT durchgeführt.

Der Betrieb der BWS setzte zunächst einmal voraus, dass von CTA eine „Ausgangssituation“ geschaffen wurde, um überhaupt mit dem Automatikbetrieb starten zu können. Hierzu war es notwendig, die beiden Traktionsbatterien, die nicht in den Fahrzeugen eingesetzt waren, und mit denen die Fahrzeuge schon seit einigen Wochen am Flottenbetrieb teilnahmen, in das Batterieregal zu verbringen. Die folgenden Fotos dokumentieren den Einfallsreichtum der notwendig war, um die beiden, je 11 t schweren Batterien in die BWS zu verbringen um sie dort mit Hilfe des Regalbediengerätes einzulagern um somit die besagte „Ausgangssituation“ für den Automatikbetrieb zu schaffen.



**Abbildung 38:** Bestückung der BWS mit Batterie

Hierzu wurden die Batterien so unter ein Containerchassis gehängt (welches sonst für den Containertransport im Hinterland genutzt wird), dass das Teleskop des RBGs im Einrichtbetrieb die Batterie aufnehmen und einlagern konnte. Dies ist nur ein Beispiel für Improvisationskunst, wie sie in einem solchen Projekt manchmal nötig wird. Die zweite Batterie wurde dann mit einem vom Projektpartner GPT eigens angefertigten Tragrahmen in die Station verbracht – so ist auch zukünftig eine professionelle Bestückung der BWS sichergestellt.

Eine derart neue Technik erfordert die permanente Begleitung und Fehlerprotokollierung durch die Ingenieure der HHCT und CTA. Sowie den permanenten Informationsaustausch zwischen den Verbundpartnern und den involvierten Mitarbeitern des Terminals. In derartige Koordinationsfunktionen floss auch hier ein großer Teil der Aufwände von CTA.

Natürlich galt es auch die BWS in den 24-h-Betrieb zu überführen. Auch hier bedeutete dies, dass die Mitarbeiter des 24-h-Entstördienstes von SCA entsprechend geschult werden mussten. Im Gegensatz zu einem, vom Prinzip her zumindest bekannten AGV, war die Batteriewechselstation eine völlig neuartige Anlage. Auch die gelegentliche Überprüfung der Ladegeräte, die an den Kontaktplatten für die Batterien im Regal angeschlossen sind, gehört zu diesen Aufgaben, nebst des Wissens, wie alle diese Anlagen z.B. im Brandfalle in den Not-Aus-Zustand zu versetzen sind.

Auch der Umgang mit dem Zugang zum Automatikbereich der BWS durch die neuen Tore der „Zutrittskontrolle Automatikbereich“ (ZKA) musste geprobt werden, um Besonderheiten im Prozess zu verinnerlichen.

Organisatorisch oblag es zudem CTA sicherheitstechnische Anforderungen umzusetzen, z.B. die Aufnahme der BWS in die Feuerwehrpläne, oder die Beschilderung von Fluchtwegen.

Die Erprobung der Funktionalität der Batteriewechselstation erfolgte vorrangig durch GPT und wurde in mehreren Teilschritten ausgeführt. Zunächst wurden Einfahrttests mit einem Batterie-AGV durchgeführt, um die Positioniergenauigkeit auf der Wechselposition zu überprüfen. Es konnte gezeigt werden, dass die Fahrzeuge mit einer sehr guten Wiederholgenauigkeit (ca.  $\pm 5$  mm) innerhalb des vorgesehenen Positionierfensters positionieren. In einem zweiten Schritt wurde der eigentliche Wechselprozess mit einem auf dem Wechselplatz stehenden B-AGV ohne automatisches Ein- und Ausfahren in die Batteriewechselstation erfolgreich erprobt. Nachdem beide Teilschritte zuverlässig getestet werden konnten, erfolgten die Tests der vollautomatischen Batteriewechselprozedur inklusive dem Zusammenspiel aller beteiligten Softwaresysteme.

Bei den bislang durchgeführten Batteriewechseln konnte die ordnungsgemäße Funktion der Batteriewechselstation nachgewiesen werden. Das Regalbediengerät kann die Batterie zuverlässig aus den Fahrzeugen entnehmen, auf einem Ladeplatz im Regal absetzen und im Gegenzug das Batterie-AGV mit einer geladenen Batterie bestücken. Abweichungen bei der Positionierung der Fahrzeuge werden vom Regalbediengerät erkannt und für den

Wechselvorgang berücksichtigt. Die automatische Kontaktierung der Batterien in den Fahrzeugen und auf den Ladeplätzen funktioniert zuverlässig, ebenso wie das Aufladen der Batterien in der BWS.

Um eine deutlich größere Flotte von batteriebetriebenen Fahrzeugen abzubilden und die Leistungsfähigkeit der BWS zu untersuchen, wurde ein besonderer Testlauf durchgeführt, bei dem die Batterie-AGV innerhalb eines Tages permanent zum Batteriewechsel beauftragt wurden. Dabei wurden über 30 Batteriewechsel durchgeführt, wobei beide Fahrzeuge abwechselnd in die BWS beauftragt wurden.

Bis auf eine dreimalige Störung aufgrund einer defekten Überwachungskomponente, konnten alle Batteriewechsel fehlerfrei durchgeführt werden. Die fehlerbehaftete Komponente wurde inzwischen ausgetauscht, sodass mittlerweile ein sehr zuverlässiger Betrieb der BWS erreicht wurde.

Der Test hat gezeigt, dass die Dauer für den Batteriewechselvorgang bei durchschnittlich 4:10 min liegt. Inklusive Ein- und Ausfahrt hält sich ein Batterie-AGV während einer Wechselprozedur ca. 6 min in der BWS auf. Damit konnte die angestrebte Wechselzeit von 10 min deutlich unterschritten werden.

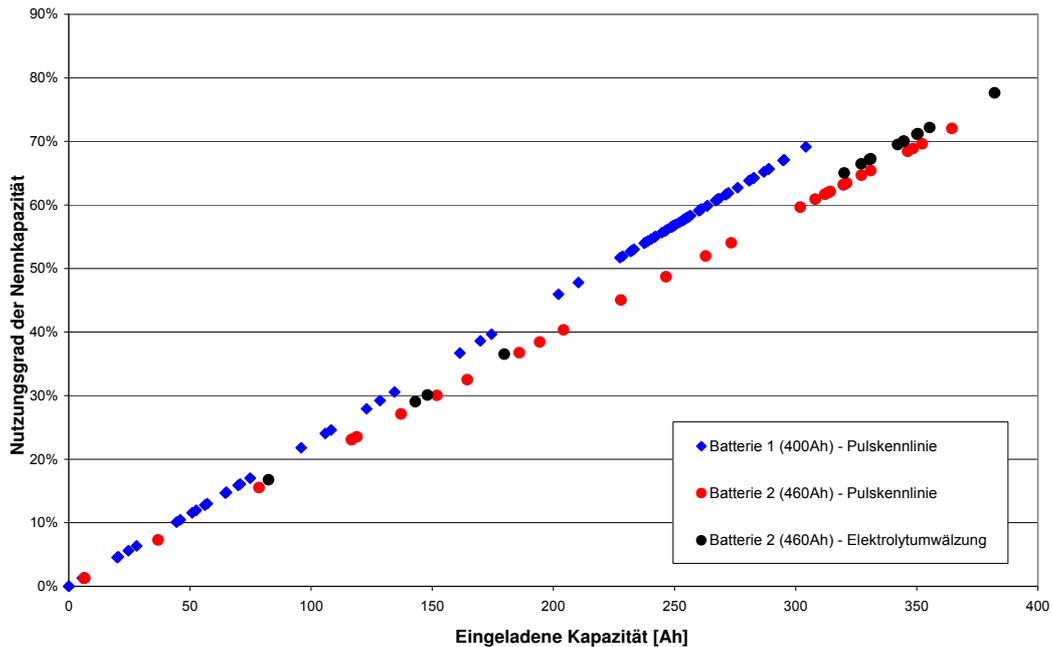
Die Sicherheitsfunktionen der BWS wurden nach der Beauftragung durch CTA gemeinsam mit dem TÜV Nord erfolgreich überprüft.

### **Batterieladezyklen**

Die Ladezeiten für die Batterien hängen von der eingesetzten Ladetechnik, der eingestellten Ladekennlinie und dem Entladegrad der Batterien ab. In diesem Projekt wurden für die Blei-Säure-Batterien zwei unterschiedliche Ladekennlinien eingesetzt.

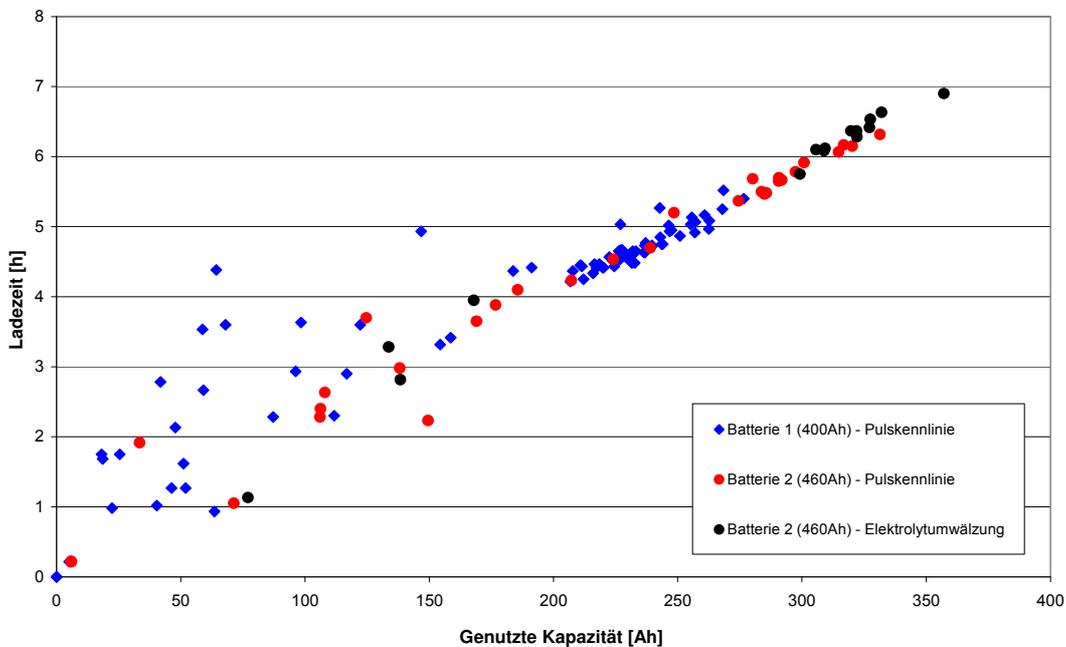
Alle im Projekt eingesetzten Batterien können mit der IWU-Kennlinie geladen werden. Eines der Ladegeräte ist mit einer mechanischen Elektrolytumwälzung (EUW) eingesetzt, bei dem über eine im Ladegerät eingebaute Membranpumpe Umgebungsluft in die Batteriezellen eingeblasen wird. Die aufsteigenden Luftblasen bewirken ebenfalls eine Durchmischung des Elektrolyten. Durch die EUW-Technologie soll die Ladezeit der Batterien nach Herstellerangaben um etwa 30 min. verkürzt werden. Diese Kennlinie kann nur für die 460 Ah Batterie genutzt werden, da nur diese über das erforderliche Luftführungssystem verfügen.

In der folgenden Abbildung ist zunächst der Zusammenhang zwischen der eingeladenen Energie und den Nutzungsgrad der Batterien dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Nennkapazitäten und der Ladekennlinien ist der Nutzungsgrad bei gleicher eingeladener Kapazität nicht für alle eingesetzten Batterien gleich. So führt beispielsweise der Ladefaktor der IWU-Puls-Kennlinie von  $L_f = 1,10$  bei der gleichen eingeladenen Kapazität zu einem etwas geringeren Nutzungsgrad der Batterie als bei der Kennlinie mit Elektrolytumwälzung mit einem Ladefaktor von  $L_f = 1,07$ . Diese Unterscheidung soll zeigen, dass bei der Auswertung der Daten sehr sorgfältig vorgegangen werden muss, um alle Randbedingungen für die korrekte Auswertung zu berücksichtigen.



**Abbildung 39:** Ausnutzung Batteriekapazität

In der **Abbildung 40** sind die Ladedauern der beiden Batterietypen mit unterschiedlichen Ladekennlinien in Abhängigkeit von der eingeladenen Kapazität aus dem Feldversuch dargestellt. Der Großteil der Wertepaare liegt in einem Bereich über 200 Ah eingeladener Kapazität. Dies sind die Messwerte aus dem durchgängigen Probebetrieb, ohne dass ein frühzeitiger Batteriewechsel angefordert wurde. Die Messwerte stammen aus den Protokollen der Ladegeräte und zeigen ein hohes Maß an Konsistenz. Die Wiederholgenauigkeit ist hoch und die Ladezeiten weisen einen nahezu linearen Zusammenhang zu den genutzten Kapazitäten auf.



**Abbildung 40:** Ladezeiten für Batterien

Entgegen der Erwartungen konnte durch den Einsatz der EUW bei den 460 Ah-Zellen keine Verkürzung der Ladezeiten festgestellt werden. Die Ladezeiten bei den Ladungen mit eingesetzter EUW lagen sogar etwas höher als bei den Ladungen ohne EUW. Leider

konnten bisher nur relativ wenige Werte mit EUW ermittelt werden, so dass diese Tendenz noch nicht abgesichert ist. Das so unerwartete Ergebnis wird auf jeden Fall mit den Herstellern von Batterien und Ladegeräten diskutiert werden.

### Energie aus Stromnetz

Für eine ganzheitliche Bewertung des Systems hinsichtlich des Energiebedarfs sind neben dem Energiebedarf der Fahrzeuge auch der Ladevorgang sowie die Wirkungsgrade der eingesetzten Technologien und Komponenten besonders interessant. Letztlich ist die Menge elektrischer Energie in kWh, die aus dem Stromnetz des Betreibers für das Laden der Batterien entnommen wird, für die erzeugten CO<sub>2</sub>-Emissionen, Klimagase und einen Großteil der Betriebskosten ausschlaggebend.

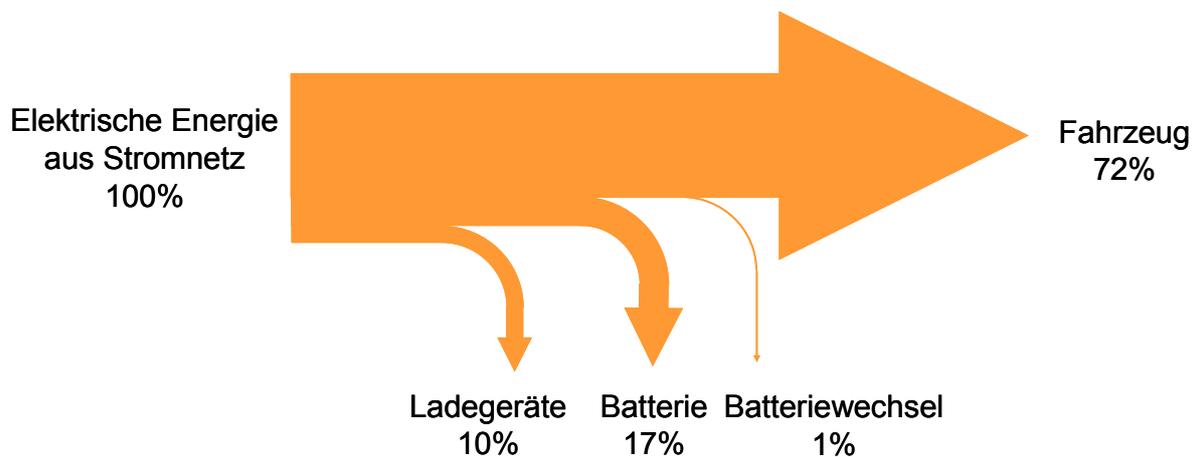
Während des gesamten Feldversuchs wurde die von den Ladegeräten der BWS eingeladene Energie in die Batterien gemessen. Gleichzeitig wurde die von allen Ladegeräten aus dem Stromnetz entnommene Energie erfasst. Aufgrund des hohen Anteils von Teilladungen während der Inbetriebnahme sind diese Daten jedoch nicht aussagekräftig und daher nicht auswertbar. Aus diesem Grund wird für den Wirkungsgrad der Ladegeräte die Herstellerangabe von 90 % verwendet.

Das nächste Glied in der Kette der Wirkungsgrade ist die Batterie selbst, die aufgrund der chemischen Prozesse während des Lade- und Entladevorgangs Verluste erzeugt. Als mittlere Ladespannung pro Zelle können 2,3 V angesetzt werden, die mittlere Entladespannung beträgt in diesem Fall 2,0 V. Letzteres konnte aus der Auswertung der Batteriecontroller ermittelt werden. Der Ladefaktor (Lf) bei der Ladekurve mit Elektrolytumwälzung beträgt 1,07. Dies bedeutet, dass beim Ladevorgang 7 % mehr Ah in die Batterie eingeladen werden als zuvor entnommen worden sind. Mit den vorgestellten Werten folgt für den Wirkungsgrad der Batterie ein Wert von 81 %.

$$\eta_{\text{Batterie}} = (2,0 \text{ V} / 2,3 \text{ V}) \times (1 \text{ Ah} / 1,07 \text{ Ah}) = 81 \% \quad \text{Gl. 1}$$

Um die Wirkungsgradkette zu vervollständigen, muss auch der Energiebedarf der BWS für den Batteriewechsel berücksichtigt werden. Hierbei handelt es sich um die Energie, die von den elektrischen Antrieben des RBG für die Bewegung der entladenen und der geladenen Batterie bezogen auf die in der Batterie enthaltene Energie. Die abgeschätzte Energiemenge für einen Wechsellvorgang beträgt nach einer Abschätzung etwa 1 kWh, bezogen auf die Nutzenergie der Batterien ist dies weniger als 1 %.

In der **Abbildung 41** sind die einzelnen Wirkungsgrade in einem Sankey-Diagramm dargestellt. Demzufolge können 72 % der aus dem Stromnetz entnommenen elektrischen Energie im Fahrzeug genutzt werden. Werden der im Feldversuch ermittelte Energiebedarf von 14,2 kWh pro Betriebsstunde und der Gesamtwirkungsgrad von 72 % angesetzt, so muss bei einer wirtschaftlichen Bewertung des Systems mit einem Energiebedarf von 19,7 kWh pro Betriebsstunde aus dem Stromnetz gerechnet werden.



**Abbildung 41:** Energieflüsse

In dieser Betrachtung werden eventuelle Nebenverbraucher innerhalb der BWS wie etwa Belüftung nicht berücksichtigt, da sie bei der im Projekt genutzten Anlage nicht erforderlich waren. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass diese keinen merklichen Einfluss auf die Energiebilanz haben werden.

Der Wert von 72% Nutzbarkeit der eingesetzten Energie ist im Vergleich zu einem Fahrzeug mit Dieselmotor bereits sehr gut. Fahrzeuge mit Dieselmotor können bei einem derartigen Einsatz nur etwa 25% der im Kraftstoff chemisch gebundenen Energie effektiv nutzen.

#### AP 4.4: Laborversuche Batterie (ika)

Die elektrischen Tests wurden mit dem Batterietest- und -prüfgerät des ika vorgenommen. Aus den Messdaten der elektrischen Tests lassen sich die charakteristischen Kenndaten des Batteriesystems bestimmen, um somit eine Bewertungsgrundlage für die Auslegung und den möglichen Einsatz im Fahrzeug zu erhalten. Die Ergebnisse werden vom ika zur Validierung des Batteriemodells genutzt, das im Rahmen von Längsdynamik-Simulationen zum Einsatz kommt.

Aus technischen Gründen wird auf dem Prüfstand nur ein Batteriemodul mit einer Nennspannung von 80 V getestet. Das im Fahrzeug installierte Gesamtsystem besteht aus 9 Modulen und weist eine Nennspannung von 720 V auf.

Für die Versuche werden drei unterschiedliche 80 V-Module, bestehend aus jeweils 40 in Serie geschalteten Zellen, von zwei unterschiedlichen Herstellern durch Gottwald bereit gestellt. Die untersuchten Batterien werden im Folgenden als Batterie 1, Batterie 2 und Batterie 3 bezeichnet. Dabei ist zu beachten, dass die Zellen der Batterie 3 nicht in den Fahrzeugen im Feldversuch eingesetzt wurden, sondern aus einem früheren Projekt stammen. Diese Batterie wurde für langwierige Testzyklen genutzt, für die die im Projekt angeschafften Batterien aus zeitlichen Gründen nicht zur Verfügung standen. Technisch ist diese Batterie jedoch mit den neu angeschafften Batterien vergleichbar. Die Spezifikationen der Batterien sind in **Tabelle 4** aufgelistet.

**Tabelle 4:** Batteriemodulspezifikationen

Typ	Batterie 1	Batterie 2	Batterie 3
<b>Nennkapazität</b>	400 Ah	460 Ah	465 Ah
<b>Nutzkapazität (80%)</b>	320 Ah	368 Ah	372 Ah
<b>Nennspannung</b>	80 V	80 V	80 V
<b>Kabel/Stecker</b>	50 mm <sup>2</sup> /160 A Rema	50 mm <sup>2</sup> /160 A Rema	50 mm <sup>2</sup> /160 A Rema
<b>Gewicht</b>	1.015 kg	1.208 kg	1.217 kg
<b>Abmaße</b>	L = 844 mm B = 876 mm H = 537 mm	L = 844 mm B = 876 mm H = 627 mm	L = 697 m B = 845 mm H = 772 mm

Der Aufbau eines 80 V-Moduls ist in **Abbildung 42** dargestellt. Ein Metallgehäuse schützt die Batterie vor Schädigung durch mechanische Belastung.

**Abbildung 42:** 80 V-Modul

Im Fahrzeug sollen die Batterien bei jedem Ladestand eine Leistung von 250 kW bereit stellen können. Daraus folgt, dass die Batterien bei Nennspannung mit ca. 347 A belastet werden (Gl. 2).

$$250 \text{ kW}: 720 \text{ V} = 347 \text{ A}$$

Gl. 2

Bei Berücksichtigung eines lastbedingten Spannungsabfalls von ca. 50 V ergibt sich für dieselbe Maximalleistung ein maximaler Entladestrom von 373 A (Gl. 3). Damit liegen die Spitzenströme etwa im Bereich 1 C.

$$250 \text{ kW}: 670 \text{ V} = 373 \text{ A}$$

Gl. 3

Aufgrund der Auslegung der Steckverbinder und der Leistungskabel ist der entnehm- und zuführende Dauerstrom auf 160 A begrenzt. Dieser Wert darf nur kurzzeitig überschritten werden, anderenfalls besteht die Gefahr einer zu hohen Wärmebelastung an Stecker/Verbinder/Kabel.

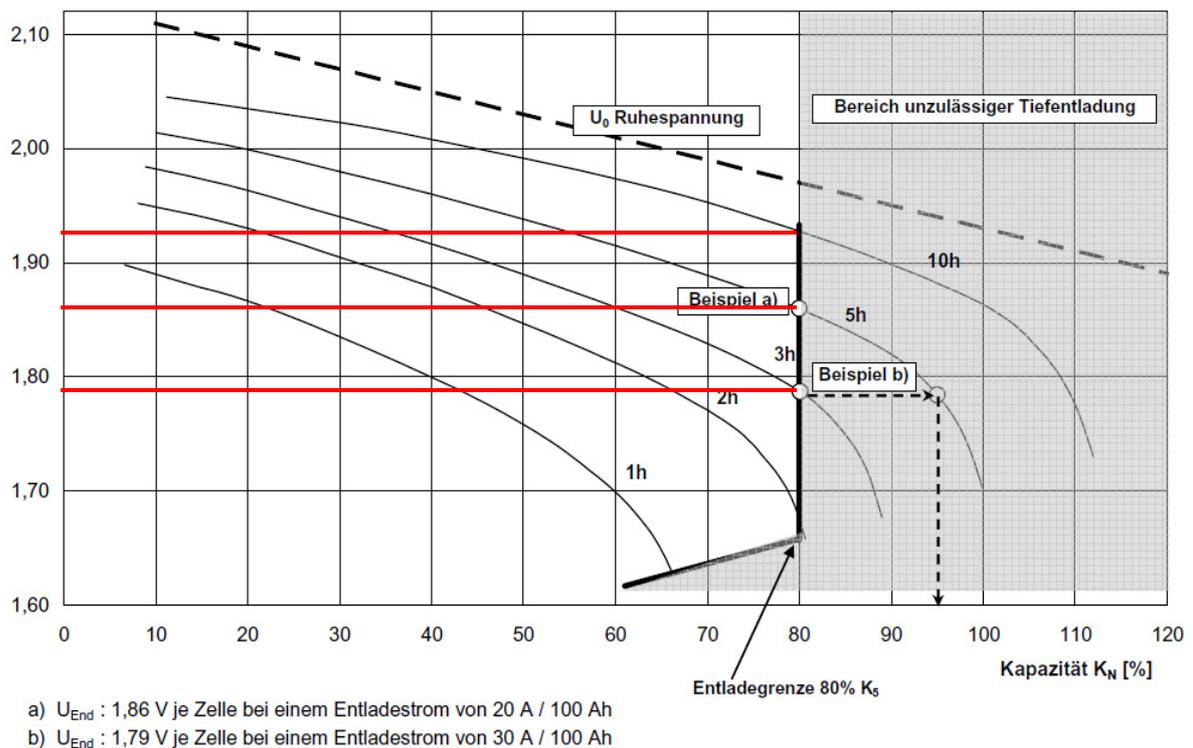
Folgende Tests wurden an den beiden 80 V-Modulen Batterie 1 und Batterie 2 durchgeführt:

- Kapazitätsbestimmung: C/3, C/5, C/10

- Bestimmung des Innenwiderstands in Abhängigkeit des Ladegrads
- Bestätigung der maximal entnehmbaren Leistung in Abhängigkeit des Ladegrads
- Dynamisches Verhalten bei Lastsprung in Abhängigkeit des Ladegrads
- Kapazität beim Nachfahren von typischen Lastprofilen

Ergänzende Tests zur Bestimmung der nach Rekuperation wieder nutzbaren Energie werden mit Batterie 3 durchgeführt. Die Bestimmung der Spannungsgrenzen sowie der Entladeströme erfolgt auf Grundlage des ZVEI-Merkblatts „Anforderungen an Batterie-Entladeanzeiger für Blei-Antriebsbatterien“ (**Abbildung 43** und **Abbildung 44**). Sämtliche Tests werden mindestens drei Mal durchgeführt. Die dargestellten Ergebnisse sind jeweils die Mittelwerte der aus den Versuchen.

Entladespannung je Zelle[V]



**Abbildung 43:** Entladespannungsgrenzen für Batterien [Quelle ZVEI]

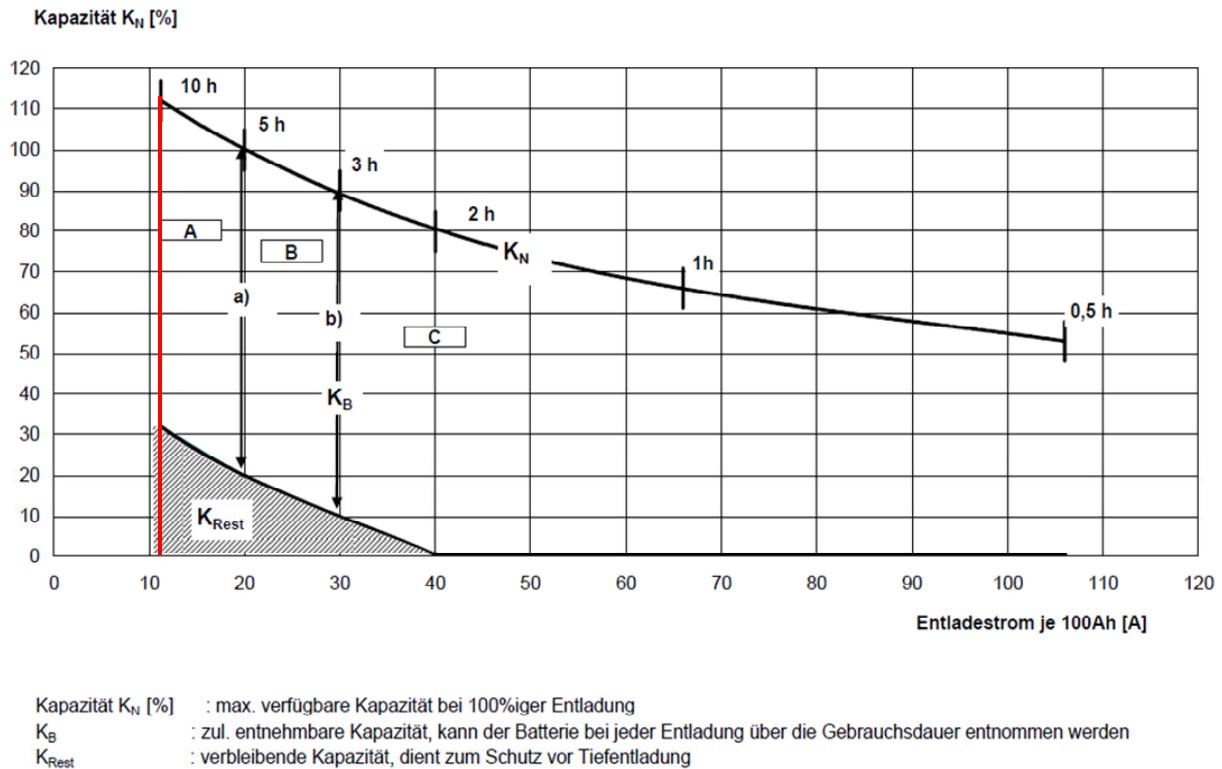


Abbildung 44: Entladestrom in Abhängigkeit der Entladedauer [Quelle ZVEI]

### Kapazitätsbestimmung

Die Batterien wurden vor den Kapazitätsmessungen jeweils durch mehrere C/5-Entladezyklen konditioniert. Die Ergebnisse der Konstantstromentladungen für beide Batterien sind **Abbildung 45** zu entnehmen.

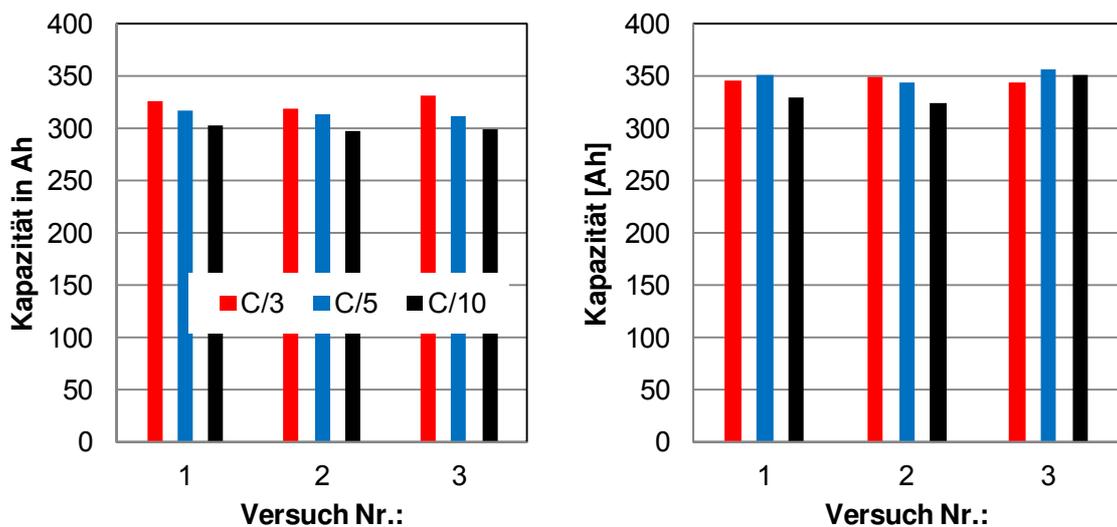


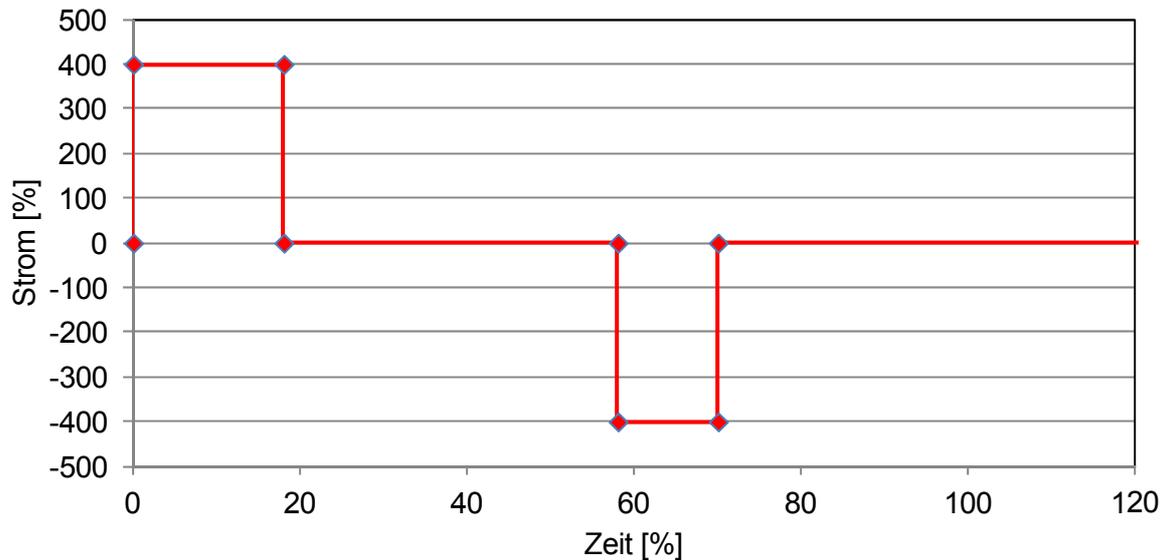
Abbildung 45: Ergebnisse der Konstantstromentladungen

Bei den Kapazitätsbestimmungen für die Batterie 1 und die Batterie 2 wurden im Mittel 97,6 % bzw. 93,1 % der vom Hersteller angegebenen Kapazität gemessen, bezogen auf 80 % der Nennkapazität. Zu beobachten ist dabei, dass die entnehmbare Ladung mit

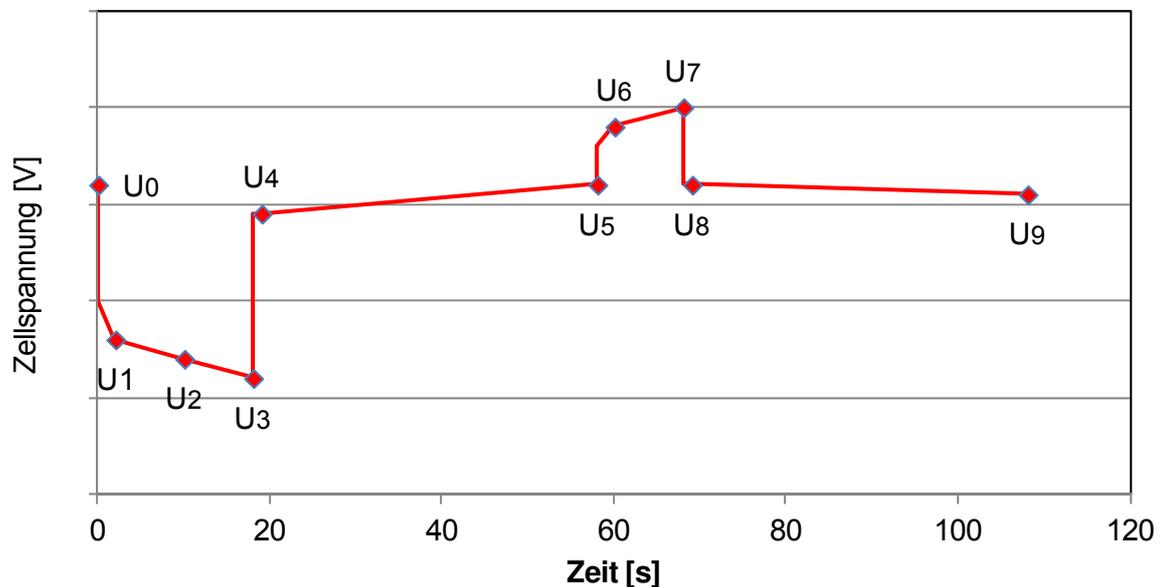
zunehmenden Entladeströmen größer wird. Dies ist auf die unterschiedlichen unteren Spannungsgrenzen zurückzuführen.

### Bestimmung Innenwiderstand

**Abbildung 46** und **Abbildung 47** zeigen schematisch das Strom- und Spannungsprofil der Parameter-Test-Prozedur zur Bestimmung von Innenwiderstand, Leerlaufspannung und Pulsleistung



**Abbildung 46:** Stromprofil zur Bestimmung von Innenwiderstand und Peakleistung



**Abbildung 47:** Spannungsverlauf und Orientierungspunkte zur Bestimmung von Innenwiderstand und Peakleistung

**Tabelle 5** zeigt eine Übersicht über den Verlauf und die Dauer der Strompulse des Parameter-Tests.

**Tabelle 5:** Verlauf der Pulsladung/-entladung

Schrittdauer	Gesamtzeit	Strom
18 s	18 s	400 A
40 s	58 s	0 A
10 s	68 s	-400 A
40 s	108 s	0 A

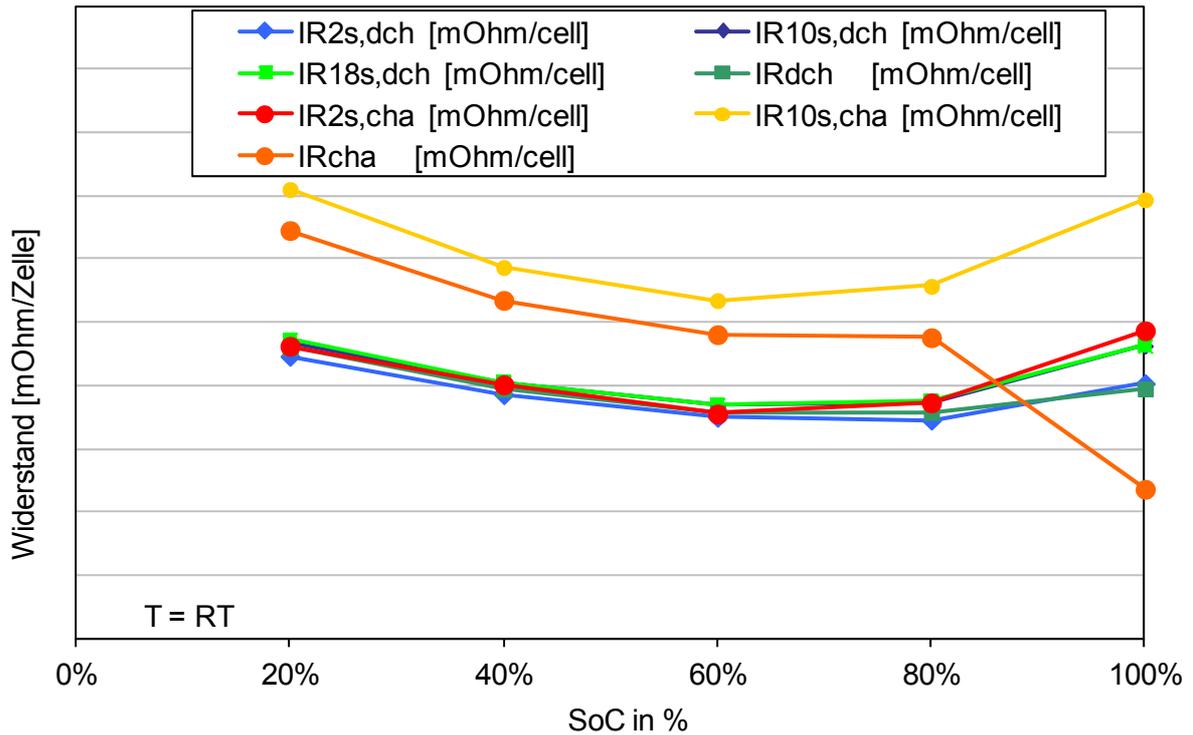
Die Punkte  $U_0 - U_9$  in Abbildung 47 markieren die, für die Berechnung der Innenwiderstände und Pulsleistungen, relevanten Stellen. Die an diesen Punkten gemessenen Ströme und Spannungen werden, wie in **Tabelle 6** beschrieben, zur Berechnung der Innenwiderstände nach den unten aufgeführten Formeln verwendet.

**Tabelle 6:** Berechnung der Innenwiderstände

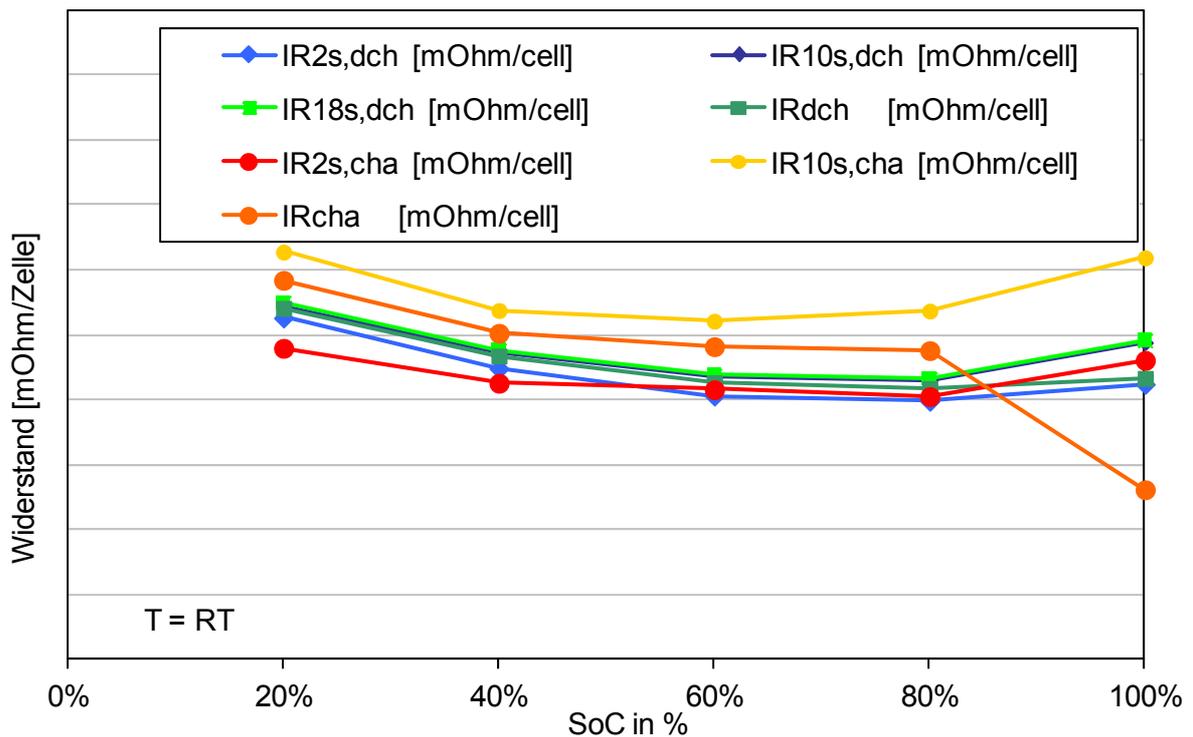
Name	Formel	dt
2 s Entladewiderstand	$IR_{2s,dch} = \frac{U_0 - U_1}{I_1}$	2 s
10 s Entladewiderstand	$IR_{10s,dch} = \frac{U_0 - U_2}{I_2}$	10 s
18 s Entladewiderstand	$IR_{18s,dch} = \frac{U_0 - U_3}{I_3}$	18 s
Entladewiderstand	$IR_{dch} = \frac{U_3 - U_5}{I_3}$	40 s
2 s Ladewiderstand	$IR_{2s,cha} = \frac{U_5 - U_6}{I_6}$	2 s
10 s Ladewiderstand	$IR_{10s,cha} = \frac{U_5 - U_7}{I_7}$	10 s
Ladewiderstand	$IR_{cha} = \frac{U_9 - U_7}{I_7}$	40 s

Die Prozedur wird bezüglich Strompulsstärke und -dauer an das zu messende Batteriesystem angepasst. Der Impuls-Testzyklus wird, beginnend bei 100 % SOC, nach je 20 % Kapazitätsentnahme durchgeführt. Zu berücksichtigen ist, dass bei 100% SOC der Pulsladestrom auf 5 A/100 Ah und bei allen SOC's die maximale Spannung auf die Gasungsspannung (96 V) begrenzt wird.

In den beiden nachfolgenden Diagrammen (**Abbildung 48** und **Abbildung 49**) sind die Ergebnisse der Bestimmung der Innenwiderstände der Batterie 1 und der Batterie 2 dargestellt. Der auffällig niedrige Wert des Innenwiderstands beim Laden (Ladekurve  $IR_{cha}$ ) bei vollständig geladener Batterie (100 % SOC) ist darauf zurückzuführen, dass der Impulsladestrom bei diesem Ladezustand auf 5 A/100 Ah begrenzt ist.



**Abbildung 48:** Durchschnittliche Innenwiderstände Batterie 1



**Abbildung 49:** Durchschnittliche Innenwiderstände Batterie 2

Die Verläufe der Innenwiderstände beider Batterien verdeutlichen, dass ein Betrieb bei einem Ladezustand zwischen 40% und 80% mit verhältnismäßig geringen Verlusten verbunden ist. Die Kurven zeigen einen erwarteten Verlauf.

#### Ermittlung der Impulsleistungsfähigkeit

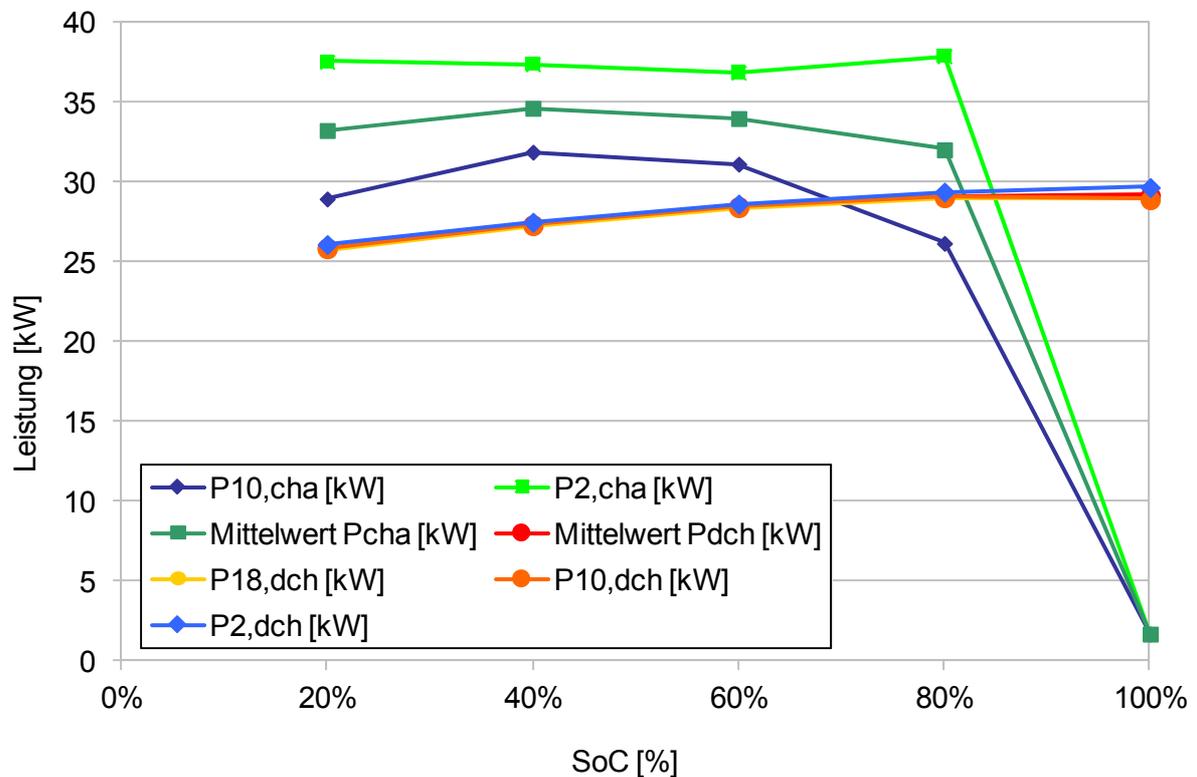
Die Impulsleistung wird im Rahmen der Parametertest-Prozedur bestimmt. Aus den Ergebnissen der Parametertest-Prozedur können, unter Benutzung der in **Tabelle 7**

aufgeführten Zusammenhänge, mit den Messwerten an den Punkten 1-9 aus Abbildung 47, die Impulsleistungen berechnet werden.

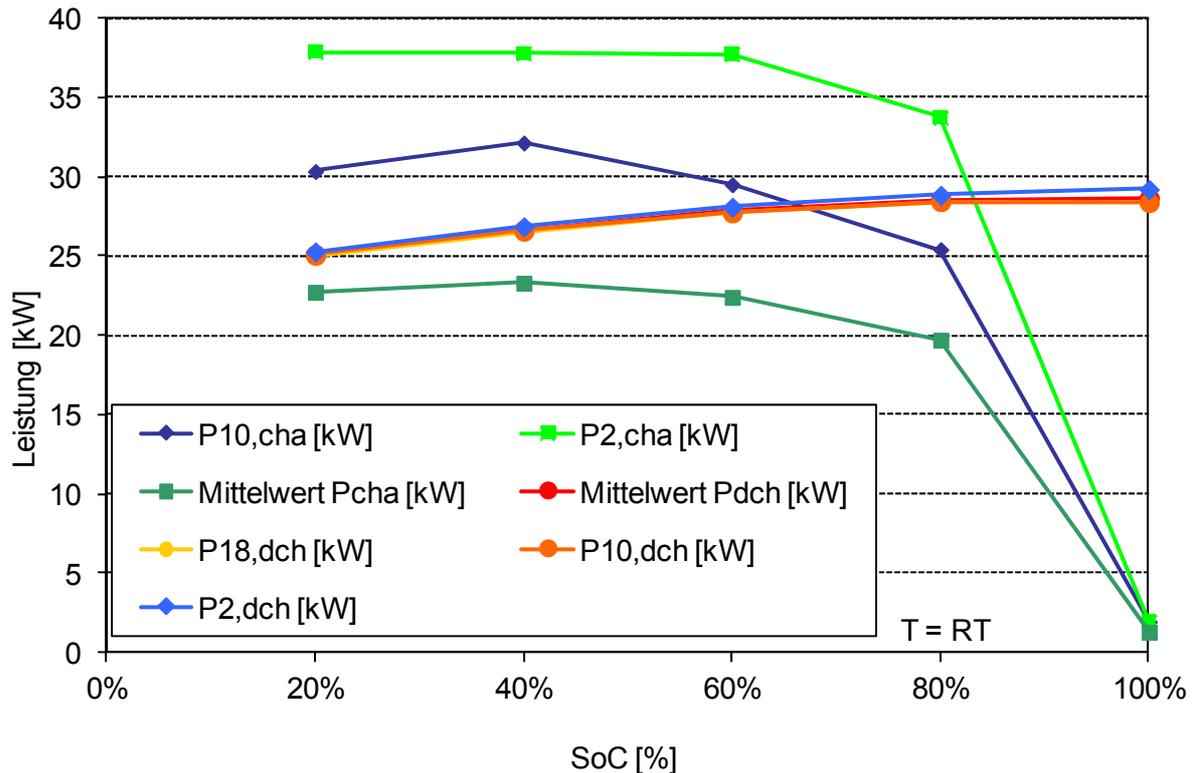
**Tabelle 7:** Formeln zur Berechnung der Impuls-lade-/Entladeleistung

Name	Formel	dt
2 s Entladeleistung	$P_{2s,dch} = U_1 * I_1$	2 s
10 s Entladeleistung	$P_{10s,dch} = U_2 * I_2$	10 s
18 s Entladeleistung	$P_{18s,dch} = U_3 * I_3$	18 s
2 s Ladeleistung	$P_{2s,ch} = U_6 * I_6$	2 s
10 s Ladeleistung	$P_{10s,ch} = U_7 * I_7$	10 s

Bei den unten abgebildeten Impulsleistungsdiagrammen (**Abbildung 50** und **Abbildung 51**) der Batterie 1 und der Batterie 2 fällt die bei einem Ladestand von 100 % SOC signifikant niedrigere Impulsleistung beim Laden auf. Das kann mit der oben beschriebenen Begrenzung des maximalen Ladestroms begründet werden.



**Abbildung 50:** Durchschnittliche Impulsleistung Batterie 1



**Abbildung 51:** Durchschnittliche Impulsleistung Batterie 2

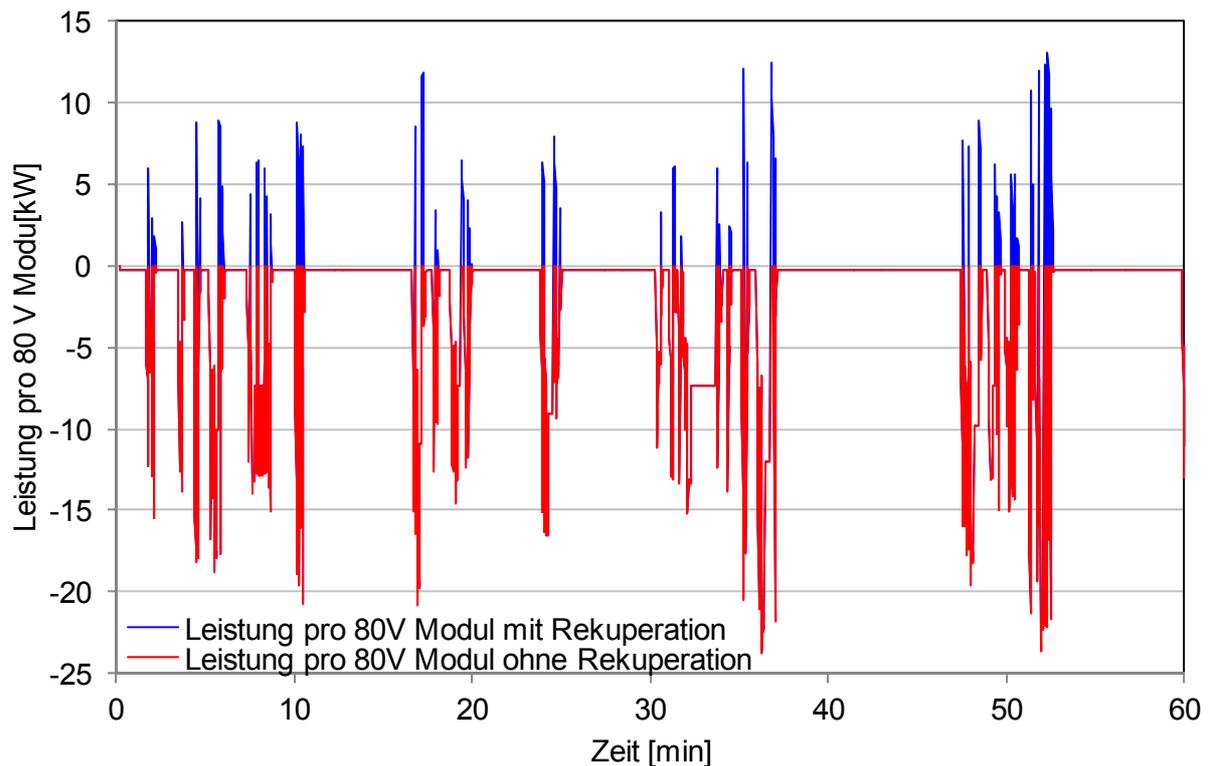
Lade- und Entladestrom des Batterietestgeräts sind auf 400 A begrenzt. Beide Batterien können die geforderten Ströme ohne Einschränkungen zur Verfügung stellen und genügen somit den gestellten Anforderungen.

### Nachfahren typischer Lastprofile und Bestimmung der rekuperierbaren Energie

Im Feldeinsatz soll der Energieinhalt der Batterie mindestens acht Stunden des normalen Betriebs abdecken. Im Rahmen dieser Tests wird auf dem Prüfstand ein typisches Lastprofil nachgefahren. Die Profile wurden im Rahmen von Längsdynamik-Simulationen des ika auf Basis realer Zyklen berechnet. Der Test sieht vor, mit der Batterie ein achtstündiges Lastprofil nachzufahren und anschließend den Restladungs- bzw. Restenergieinhalt zu ermitteln, indem die Batterie mit einer C/5-Entladung bis zur unteren C/5-Spannungsgrenze von 74,4 V entladen wird. Das achtstündige Profil hat eine Energiebilanz von -19,22 kWh.

Um eine Einschätzung über die Effektivität der Energierückgewinnung bzw. der innerhalb eines Zyklus rekuperierten und wieder nutzbaren Energie zu erlangen, wird das beschriebene Lastprofil mit der Batterie 3 zusätzlich vergleichend mit und ohne Energierückgewinnung nachgefahren und der Restenergieinhalt über eine C/5-Entladung bestimmt. Dazu wird der Batteriestrom in den Phasen in denen rekuperiert würde auf 0 A gesetzt. Das achtstündige Lastprofil ohne Rekuperation hat eine Energiebilanz von: -21,9 kWh.

Aus technischen Gründen wurde das achtstündige Lastprofil mit einer Auflösung von 0,5 Hz abgebildet.



**Abbildung 52:** Erste Stunde des Leistungsprofils mit und ohne Rekuperation

Beim Nachfahren des ermittelten typischen Lastprofils durch den Digatron-Prüfstand zeigt sich, dass alle drei untersuchten Batterien in der Lage sind, die achtstündigen Lastprofile ohne Einschränkungen zu durchfahren. **Tabelle 8** zeigt in der Zeile „Bilanz Profil“ die während der acht Stunden entnommenen Energie- und Ladungsmengen. In der Zeile „C/5-Entladung“ ist die danach noch verfügbare Energie und Ladung angegeben. In der Gesamtbilanz ist die insgesamt entnommene Ladung und Energie aufgeführt. Die Ergebnisse stellen die aus jeweils drei Versuchen gemittelten Werte dar.

**Tabelle 8:** Ladungs- und Energiebilanz des Leistungsprofilzyklus

	Batterie 1		Batterie 2		Batterie 3 (Mit Rek)		Batterie 3 (Ohne Rek)	
	Energie kWh	Kapazität Ah	Energie kWh	Kapazität Ah	Energie kWh	Kapazität Ah	Energie kWh	Kapazität Ah
Bilanz Profil	19,85	257,19	19,75	257,36	19,62	260,56	22,31	292,77
C/5 Entladung	4,5	59,31	7,128	94,01	4,95	65,44	3,16	41,98
Bilanz gesamt	24,33	316,5	26,89	350,5	24,57	325,99	25,46	334,63

In dem achtstündigen Profil sind durchschnittlich 2,69 kWh durch Rekuperation zurück gewinnbare Energie enthalten. Aus den Tests mit der Batterie 3 geht hervor, dass bei der C/5-Entladung nach einem Test, bei der diese 2,69 kWh der Batterie wieder zugeführt wurden, durchschnittlich 1,79 kWh mehr aus der Batterie zu entnehmen sind, als nach einem, bei dem die Rekuperationsphasen durch Leerlaufphasen (Batteriestrom = 0 A) ersetzt wurden. Daraus lässt sich schließen, dass ca. 66,7 % der rekuperierten Energie dem Antrieb wieder zur Verfügung stehen. Auf Basis dieser Ergebnisse in Kombination mit den Simulationsergebnissen für ein reines Batteriefahrzeug und ein Fahrzeug mit Batterie und SuperCaps sowie einer Kosten-Nutzen-Analyse von Gottwald wurde die ursprüngliche Planung zum Einsatz eines SuperCaps verworfen.

#### AP 4.5: Feldversuch SuperCaps (ika, GPT, HHLA)

Aufgrund der in AP 1.7 gewonnenen Erkenntnisse und der daraufhin genehmigten Änderung des Arbeitsplans entfällt dieses Arbeitspaket.

Anzumerken ist, dass seitens CTA bzw. seitens HHCT bereits vor der Änderung des Arbeitsplans ein sehr geringer Aufwand in diesem Arbeitspaket verbucht wurde, da man sich früh, aber auch nur kurzzeitig mit der Fragestellung des Feldversuchs zu SuperCaps beschäftigt hatte.

#### AP 4.6: Auslegungskennzahlen (GPT, HHLA)

Der Feldversuch hat gezeigt, dass mit batterie-elektrisch betriebenen AGV die gleiche Transportleistung erbracht werden kann wie mit dieselmotorisch angetriebenen Fahrzeugen. Es können die gleichen Fahrleistungen erreicht werden und die Zeiten für den Batteriewechselvorgang sowie die damit verbundenen An- und Abfahrten zur Batteriewechselstation haben nach jetzigen Erkenntnissen keinen messbaren Einfluss auf die Performance des Systems.

Um die Möglichkeiten für einen weiteren Ausbau der Batterie-AGV-Flotte bei CTA zu bewerten, sollen auf Basis der Ergebnisse aus dem Feldversuch Auslegungskennzahlen abgeleitet werden. Die Auslegungskennzahlen müssen sowohl die fahrzeug- und batterietechnischen als auch die logistischen Gegebenheiten des Container-Terminals berücksichtigen und dienen in erster Linie der Dimensionierung der BWS. Diese beinhaltet die erforderliche Anzahl von Manipulatoren für die Batteriewechsel, die Anzahl der benötigten Wechselbatterien und Ladegeräte sowie die elektrische Anschlussleistung und den zu erwartenden Energiebedarf aus dem Stromnetz. Die Festlegung der erforderlichen Auslegungskennzahlen sowie die Auswahl der betrachteten Szenarien erfolgte in Abstimmung der beiden Projektpartner GPT und CTA.

In der folgenden Tabelle sind die relevanten Auslegungskennzahlen, deren Werte sowie deren Quelle aufgeführt. Die Berechnung der Auslegungskennzahlen erfolgte auf Basis der im Feldversuch ermittelten Daten. Die Kennzahlen sind gegenüber den Werten aus dem Feldversuch teilweise noch gerundet worden.

**Tabelle 9:** Auslegungskennzahlen

Kenngroße	Wert	Quelle
Energieverbrauch pro Fahrstunde	33,9 kW	Auswertung Feldversuch
Energieverbrauch pro Stillstandsstunde	ca. 1 kW	Datalogger
Fahranteil pro Betriebsstunde	40%	AGV-Managementsystem, Erfahrungswert
Energieverbrauch in Peak-Situation	14,2 kW	Hergeleitet aus Fahranteil
Nutzbare Energiemenge pro Batterieladung, 400 Ah Batterie	207 kWh	Hergeleitet aus Batteriedaten
Betriebszeit pro Batterieladung	14,6 h	Hergeleitet aus Verbrauch
Ladedauer/ Vollladung (mit/ ohne EUW)	7 h	Ladegeräte, BWS
Batteriewechselzeit	5-6 min	BWS
Betriebsstunden pro Jahr	5.500 h	CTA

Der Energieverbrauch kann dabei mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$\text{Verbrauch} = \text{Verbr\_Fahren} \times \text{Fahranteil} + \text{Verbr\_Stehen} \times (1 - \text{Fahranteil}) \quad \text{Gl. 4}$$

Die nutzbare Energiemenge pro Batterieladung wird auf Basis der 400 Ah Batterie mit folgender Gleichung ermittelt:

$$\text{Energiemenge} = 400 \text{ Ah} \times 720 \text{ V} \times 0,8 \text{ (Entladungsgrenze)} \times 0,9 \text{ (Alterung)} \quad \text{Gl. 5}$$

Die Einsatzzeit pro Batterieladung kann wie folgt berechnet werden:

$$\text{Einsatzzeit} = \text{Nutzbare Energiemenge pro Batterieladung} / \text{Verbrauch} \quad \text{Gl. 6}$$

Die oben berechneten 14,6 h ist die durchschnittliche Einsatzzeit, die pro Batterieladung während einer Peak-Situation erreicht wird. Während der Peak-Situation sind die Fahrzeuge durchgehend im Betrieb (Einsatzzeit = Betriebszeit). Aus den 5.500 Betriebsstunden im Jahr wird ersichtlich, dass im Terminalbetrieb auch Zeiträume vorkommen, in denen die Fahrzeuge nicht durchgehend im Betrieb sind. Während dieser Zeiten wird die Einsatzzeit pro Batterieladung deutlich höher liegen. Die im AP 4.2 ermittelten Einsatzzeiten pro Batterieladung bestätigen dies.

Die Auslegungskennzahlen sind wesentliche Daten für die Dimensionierung eines zukünftigen Batterie-AGV-Systems. Die Anzahl der erforderlichen Wechselbatterien pro Fahrzeug berechnet sich aus dem Verhältnis der Zeit für einen Ladevorgang und der erzielbaren Betriebsdauer der AGV mit einer Batterieladung:

$$n_{\text{WBatt}} = 7 \text{ h} / 14,6 \text{ h} = 0,48 \approx 0,5 \quad \text{Gl. 7}$$

Für die Berechnung wird die Einsatzzeit der Fahrzeuge während einer Peak-Situation herangezogen, da auch bei einer langen Phase einer vollen Auslastung des Terminals genügend Wechselbatterien zur Verfügung stehen müssen. Da sich auch immer eine Batterie in jedem Fahrzeug befindet, berechnet sich die gesamte Anzahl der Batterien für die Flotte zu:

$$n_{\text{Batt}} = n_{\text{AGV}} \times (1 + n_{\text{WBatt}}) \quad \text{Gl. 8}$$

Gleichzeitig muss für jede Wechselbatterie auch ein Ladegerät vorhanden sein:

$$n_{\text{LG}} = n_{\text{WBatt}} \quad \text{Gl. 9}$$

Aus der Einsatzzeit der Fahrzeuge während einer Peak-Situation von 14,6 h kann die maximale Anzahl an Batteriewechsels pro Tag und B-AGV ermittelt werden:

$$n_{\text{Wechsel}} = 24 \text{ h} / \text{Einsatzzeit pro Batterieladung in Peak-Situation} \quad \text{Gl. 10}$$

Mit der oben ermittelten Einsatzzeit im Peak muss jedes Fahrzeug pro Tag maximal 1,65 mal die BWS anfahren. Im Umkehrschluss kann berechnet werden, wie viele Fahrzeuge mit der eingesetzten Batteriewechselstation bedient werden können bzw. wie viele RGB für eine bestimmte Flottengröße eingesetzt werden müssen.

Die Versuche zum Batteriewechsel haben gezeigt, dass ein Batteriewechsel inkl. Ein- und Ausfahrt aus der BWS eine Dauer von ca. 5 Minuten hat. Bei einer größeren BWS mit einem längeren Regal wird eine etwas längere Wechselzeit von 6 Minuten angenommen. Bei einer Batteriewechselzeit von 6 min kann ein RGB pro Tag theoretisch 240 Batteriewechsel durchführen. Damit kann die BWS eine Flotte von ca. 145 Batterie AGV versorgen.

Bei einem durchschnittlichen Energieverbrauch von 14,2 kW pro Betriebsstunde und dem Gesamtwirkungsgrad des Systems von 72% muss pro AGV eine elektrische Anschlussleistung der Ladegeräte von etwa 20 kW eingeplant werden. Bei einer durchschnittlichen Anzahl von 5.500 Betriebsstunden pro Jahr beträgt der Energiebedarf 110 MWh pro B-AGV.

## Szenarien

Im Folgenden sollen drei Szenarien für den Einsatz von Batterie-AGV auf dem Container-Terminal Altenwerder auf Basis der festgelegten Auslegungskennzahlen gegenübergestellt werden.

Das erste Szenario ist gleich der aktuellen Situation bei CTA, also die Situation mit den beiden vorhandenen Prototypenfahrzeugen und der BWS, wie sie innerhalb dieses Projekts genutzt wurden. Im zweiten Szenario wird angenommen, dass so viele Containertransporter mit Dieselmotor durch Batterie-AGV ersetzt werden, wie mit der vorhandenen BWS, also ein RBG und 12 Regalplätze bedient werden können. In diesem Fall müssten auch weitere Wechselbatterien und Ladegeräte angeschafft werden. Innerhalb des dritten Szenarios werden alle übrigen Fahrzeuge ebenfalls ersetzt, so dass die gesamte Fahrzeugflotte von 84 AGV aus batterie-elektrischen Fahrzeugen besteht.

Die Szenarien 2 und 3 sind beispielhaft als möglichen Ausbaustufen für CTA in der **Tabelle 10** dargestellt. Natürlich sind auch andere Ausbaustufen denkbar, die technisch, logistisch oder wirtschaftlich begründet werden können. Die Tabelle gibt einen ersten Überblick über das gesamte System „Batterie-AGV“. In diesem Fall sind zunächst keine weiteren Randbedingungen wie etwa Redundanz im Falle einer RBG-Störung, zusätzliche Wartezeiten an der BWS oder die Gefahr erhöhtem Verkehrsaufkommens vor der BWS sowie dadurch bedingte Performanceeinflüsse berücksichtigt.

**Tabelle 10:** Übersicht Szenarien

Szenario	Formel		1	2	3
Flottengröße CTA		[-]	84	84	84
Anzahl Batterie AGV	$n_{\text{BAGV}}$	[-]	2	22	84
Wechselbatterien pro AGV	$n_{\text{WBatt}} = t_{\text{Lade}} / t_{\text{Betrieb}}$	[-]	1*	0,5	0,5
Anzahl Batterien pro AGV	$n_{\text{Batt}} = 1 + n_{\text{WBatt}}$	[-]	2	1,5	1,5
Anzahl Batterien gesamt	$n_{\text{Batt}_{\text{ges}}} = n_{\text{BAGV}} \times n_{\text{Batt}}$		4	33	126
Anzahl Ladegeräte gesamt	$n_{\text{LG}} = n_{\text{BAGV}} \times n_{\text{WBatt}}$	[-]	2	11	42
Anzahl Regalplätze	$n_{\text{RP}} = n_{\text{LG}} + 1$	[-]	3	12	43
erwartete Batteriewechsel/ h	$n_{\text{BW}} = n_{\text{BAGV}} / t_{\text{Betrieb}}$	[1/h]	0,1	1,5	5,8
Dauer Batteriewechsel	$t_{\text{BW}}$	[min]	6,0	6,0	6,0
Leistung RBG (BW/h)	$n_{\text{BW}_{\text{möglich}}} = 60 \text{ min} / t_{\text{BW}}$	[1/h]	10,0	10,0	10,0
Auslastung RBG	$\text{Auslastung} = n_{\text{BW}} / n_{\text{BW}_{\text{möglich}}}$	[-]	1%	15%	58%

\* bei nur zwei AGV muss Wert aufgerundet werden

In der Tabelle wird ersichtlich, dass mit der im Projekt aufgebauten BWS eine Flotte von 22 Batterie AGV betrieben werden könnte. Es müssten noch 9 Mehrfachladegeräte nachgerüstet werden, das Regal und das Regalbediengerät sind jedoch ausreichend dimensioniert. Dabei beruht die Auslegung auf einer Vollauslastung des Terminals, bei der die Einsatzzeit mit einer Batterie 14,6 h beträgt. Nicht berücksichtigt in dieser Rechnung ist eine mögliche ungleichmäßige Verteilung der Batteriewechselvorgänge. Es sollten Situationen ausgeschlossen werden, in denen ein Fahrzeug eine frisch geladene Batterie benötigt, diese aber noch nicht zur Verfügung steht. Die obige Berechnung beruht auf einer Energiebilanz des Systems BWS, bei der elektrische Energie aus dem Stromnetz hineinfließt und diese in diskreten Einheiten von voll geladenen Batterien wieder verlässt. Der Einfluss einer ungleichen Verteilung von Batteriewechseln kann nur in einer logistischen Simulation im Detail untersucht werden. Da das System nach der vorgestellten Berechnung jedoch auf eine Peak-Situation ausgelegt ist, sollte sich im normalen Terminalbetrieb eine gewisse Reserve einstellen, die ungleiche Verteilungen auffangen könnte.

Das Szenario 3 zeigt, dass die Leistungsfähigkeit des eingesetzten RBG ausreichend wäre, um die gesamte Flotte von 84 AGV bei CTA auf einen batterie-elektrischen Antrieb umrüsten zu können. In diesem Fall müsste jedoch auch das Lager entsprechend vergrößert und zusätzliche Ladegeräte beschafft werden. Bei der ausschließlichen Nutzung von Batterie-AGV stellt sich die Frage, ob eine BWS für das gesamte Terminal wirklich ausreichend bzw. sinnvoll ist, da die BWS eine Kernkomponente im Systems darstellt. Neben den Einflüssen im regulären Betrieb wie etwa die erforderlichen Anfahrtswege der Fahrzeuge und der daraus resultierende zusätzliche Verkehr oder erforderliche Wartepositionen müssen auch Sonderfälle in Betracht gezogen werden. Um einen sicheren Betrieb der AGV-Flotte auch bei Wartungsarbeiten oder Fehlerbehebungen in einer Batteriewechselstation zu gewährleisten, ist evtl. der Aufbau einer zweiten BWS oder die Ausstattung der BWS mit einem zweiten Regalbediengerät erforderlich.

In **Tabelle 11** wird der elektrische Verbrauch für die drei Szenarien gezeigt und mit dem Kraftstoffverbrauch einer gleichwertigen E-AGV-Flotte gegenübergestellt. Je nach tatsächlichen Strom- und Dieselpreisen können durch den batterie-elektrischen Antriebsstrang etwa 50 % Energiekosten eingespart werden.

**Tabelle 11:** Einsparmöglichkeiten

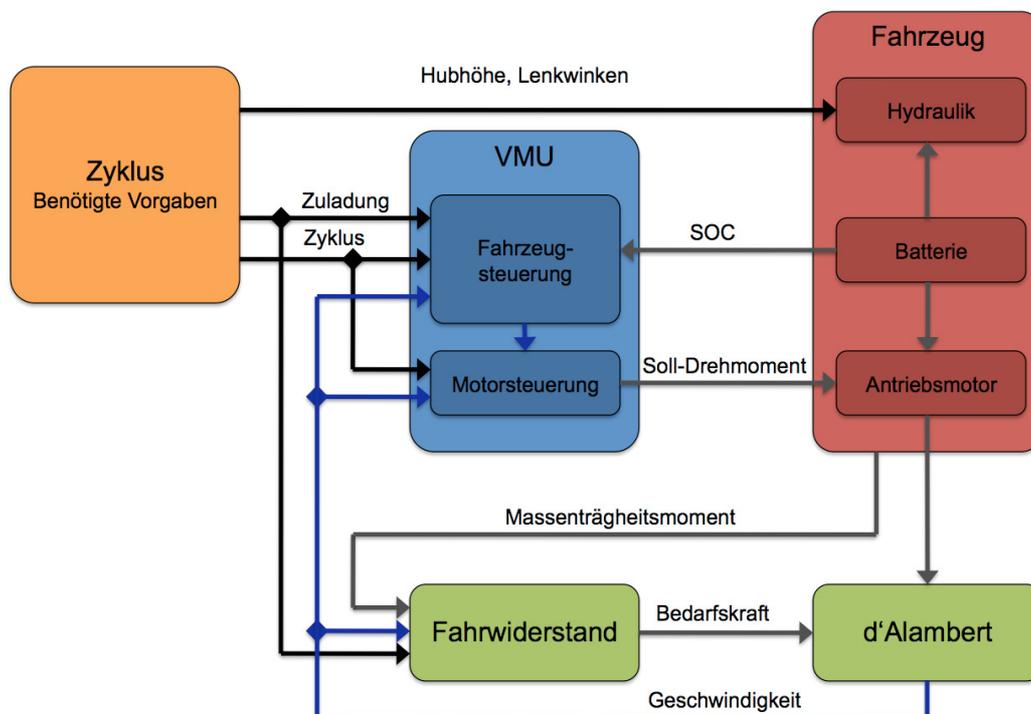
Szenario	Formel		1	2	3
Betriebsstunden/ AGV/ a	Bh	[h]	5.500	5.500	5.500
Energiebedarf/ Bh (aus Stromnetz)	W_Netz	[kWh/h]	20	20	20
Energiebedarf für Batterie-AGV	W_Flotte	[MWh]	220	2.420	9.240
Strompreis	k_kWh	[€/kWh]	0,14	0,14	0,14
Energiekosten	k_Flotte		30.800 €	338.800 €	1.293.600 €
Einsparung Dieselkraftstoff	E_Diesel	[l]	79.200	871.200	3.326.400
Dieselpreis	k_Diesel	[€/l]	0,80	0,80	0,80
Einsparung Kraftstoffkosten	E_Diesel		63.360 €	696.960 €	2.661.120 €
Einsparung Energiekosten			51%	51%	51%

### 3.5 APG 5: Simulation des batterie-elektrischen Antriebsstrangs und Auslegung der SuperCaps

#### AP 5.1: Aufbau Simulationsmodell (ika)

Mit Hilfe eines Simulationsmodells, das das physikalische Verhalten eines realen Fahrzeugs nachbildet, lässt sich mit geringem Aufwand eine Vielzahl an Fahrsituationen und Lastprofilen untersuchen, ohne aufwändige Realversuche durchführen zu müssen. Im Falle des Batterie-AGV dient das Simulationsmodell insbesondere der Untersuchung des Betriebsverhaltens und des Energiebedarfs in sog. Terminalsimulationen. Hierbei wird der Einsatz mehrerer AGV in einer virtuellen Hafenumgebung simuliert. Dabei treten verschiedene Beladungs- und Fahrzustände auf, die in Form von Zyklusvorgaben für die Simulation des Fahrzeugmodells verwendet werden. So können z. B. für unterschiedlich dimensionierte Energiespeicher Aussagen zur Einsatzzeit im Terminalbetrieb getroffen werden. Es lassen sich zudem verschiedenartige Energiespeichersysteme untersuchen und deren Effizienz beurteilen.

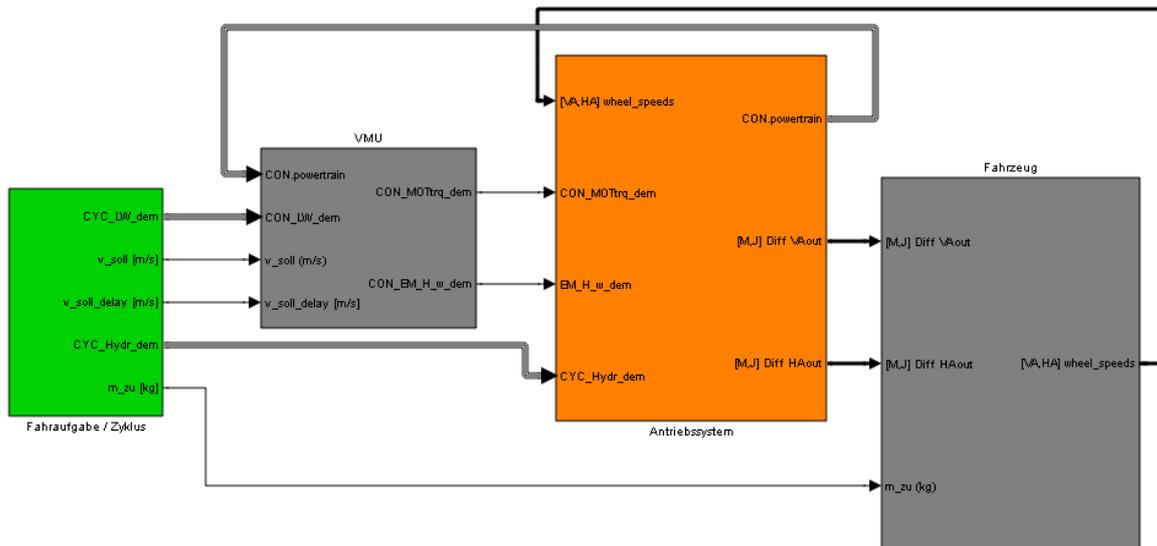
Zur Simulation des batterie-elektrischen Antriebsstrangs wurde am ika ein Modell aufgebaut, das die Längsdynamik des Batterie-AGVs abbildet. Das aufgebaute Simulationsmodell ist ein vorwärtsrechendes Längsdynamikmodell auf Basis von MATLAB/Simulink. „Vorwärtsrechend“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass aus dem vorgegebenen Fahrzyklus die Geschwindigkeit mit der aktuellen Geschwindigkeit des Fahrzeugs verglichen wird und daraus mit Hilfe eines Reglers die Soll-Drehmomente für den Antriebsmotor bestimmt werden. Im Reifenlatsch wird dann die Kräftebilanz zwischen Antriebs-Zugkraft und den Fahrwiderständen gebildet, woraus sich die Beschleunigungskraft ergibt. Aus dieser werden dann mit Hilfe der reduzierten Massenträgheiten die Beschleunigung des Fahrzeugs und die aktuelle Geschwindigkeit bestimmt. Eine Übersicht über die Modellstruktur gibt **Abbildung 53**.



**Abbildung 53:** Übersicht Modellstruktur

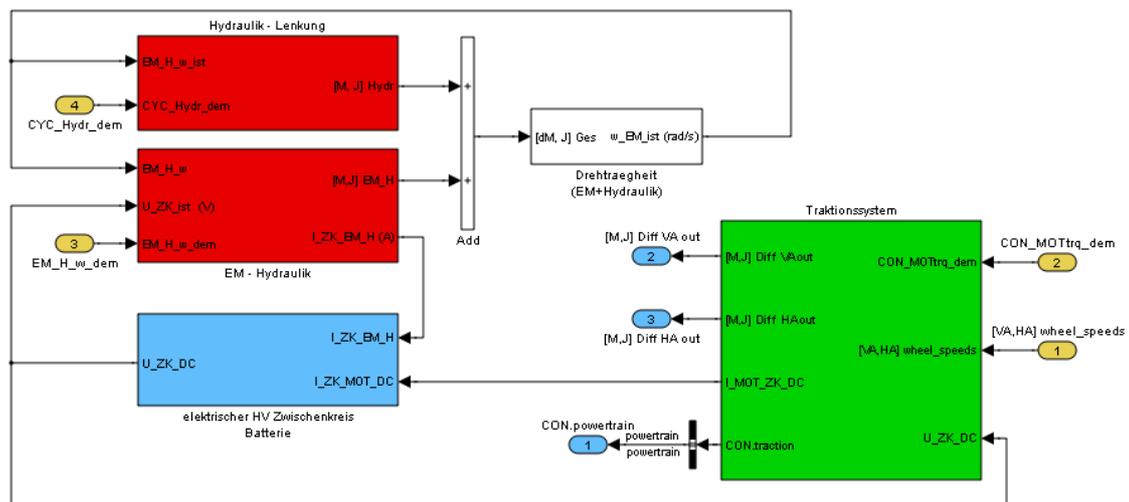
Der Vorteil eines solchen Simulationsmodells gegenüber einem rückwärts rechnenden Modells ist, dass das Steuer- und Regelverhalten mit abgebildet wird und dadurch die resultierenden Werte realistischer sind.

**Abbildung 54** zeigt die oberste Modellebene des Simulationsmodells aus Simulink. Analog zu **Abbildung 53** sind hier die einzelnen Funktionsgruppen aufgetrennt. Im linken Teilsystem sind die Fahrvorgaben wie Zyklusgeschwindigkeit, Lenkwinkel und die Zuladung hinterlegt. Im Teilsystem „VMU“ (Vehicle Management Unit) ist die Steuerung der Antriebsmotoren und der Hydraulik nachgebildet. Die Steuerungsgrößen aus der VMU werden an das Antriebssystem weitergegeben, welches die physikalischen Modelle der einzelnen Komponenten beinhaltet. Aus den Drehmomenten und Massenträgheiten wird dann im Teilsystem „Fahrzeug“ die Kräftebilanz mit den Fahrwiderstandskennwerten gebildet.



**Abbildung 54:** Oberste Ebene Simulationsmodell

In **Abbildung 55** ist das Teilsystem Antriebsstrang dargestellt. Dieses beinhaltet einerseits das Teilsystem der Hydraulik (rot), den elektrischen Zwischenkreis inklusive Batterie (blau) und das Traktionssystem mit Antriebsmotoren und Achsgetrieben (grün).



**Abbildung 55:** Teilsystem Antriebsstrang

In den Teilsystemen sind die physikalischen Wirkzusammenhänge der Komponenten modelliert. Aus den Zusammenhängen ergeben sich während der Simulation die Werte der physikalischen Größen wie Drehmomente, Drehzahlen, Spannungen und Ströme. Diese werden gespeichert und stehen somit für eine Auswertung zur Verfügung.

**AP 5.2: Parametrierung und Plausibilisierung der Simulationsmodelle (ika)**

Für die Parametrierung des Simulationsmodells wurden von GPT technische Unterlagen wie die Struktur des Antriebsstrangs, Datenblätter von verwendeten Komponenten und Schaltpläne an das ika übermittelt. Die einzelnen Komponenten des Antriebsstrangs wurden im Wesentlichen auf Basis von Wirkungsgradkennfeldern und physikalischen Zusammenhängen dargestellt. Um das Zielfahrzeug möglichst genau abbilden zu können, wurden die Komponentenmodelle mit den entsprechenden Kennfeldern der tatsächlich eingesetzten Komponenten parametrisiert.

Da nicht alle Komponentenlieferanten die benötigten Daten wie Verlustleistungskennfelder, Leistungskurven, Entlade-Spannungen, etc. bereitstellen konnten, wurde im Rahmen der Parametrierung teilweise auf ähnliche Komponenten zurückgegriffen, deren Daten verfügbar oder am ika vorhanden sind.

**AP 5.3: Validierung Simulationsmodell (GPT, ika)**

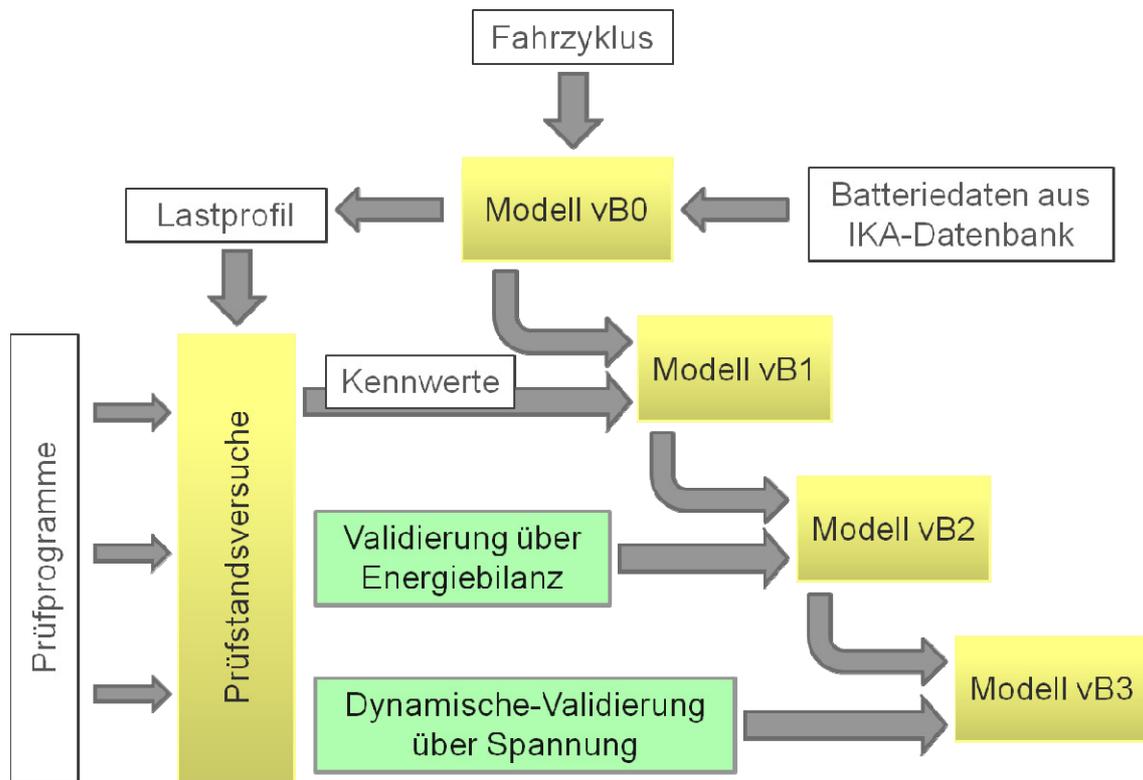
Für den Aufbau und die Validierung des Simulationsmodells wurde von GPT zusammen mit ika ein Vergleichszyklus aufgestellt, der als Referenz für den Energiebedarf des Fahrzeugs und spätere Optimierungsansätze dient.

Darüber hinaus wurden von GPT technische Unterlagen wie die Struktur des Antriebsstrangs, Datenblätter von verwendeten Komponenten und Schaltpläne an das ika übermittelt, die für den Aufbau des Modells erforderlich sind. Weiterhin wurden die für den Modellabgleich erforderlichen Messgrößen abgestimmt und die Werte übermittelt, siehe AP 4.1.

Die Validierung des Simulationsmodells erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurde das Batteriemodell anhand der aus den Prüfstandsversuchen gewonnenen Daten validiert. Im Anschluss wurde das validierte Batteriemodell in das Fahrzeugmodell eingebunden. Das Simulationsmodell des batterie-elektrischen Antriebsstrangs wurde daraufhin anhand von Messdaten realer Fahrten des Batterie-AGV validiert.

## Validierung Batteriesystem

Die Entwicklung und Validierung des Batteriemodells folgte einem iterativen Prozess, der schematisch in **Abbildung 56** dargestellt ist.

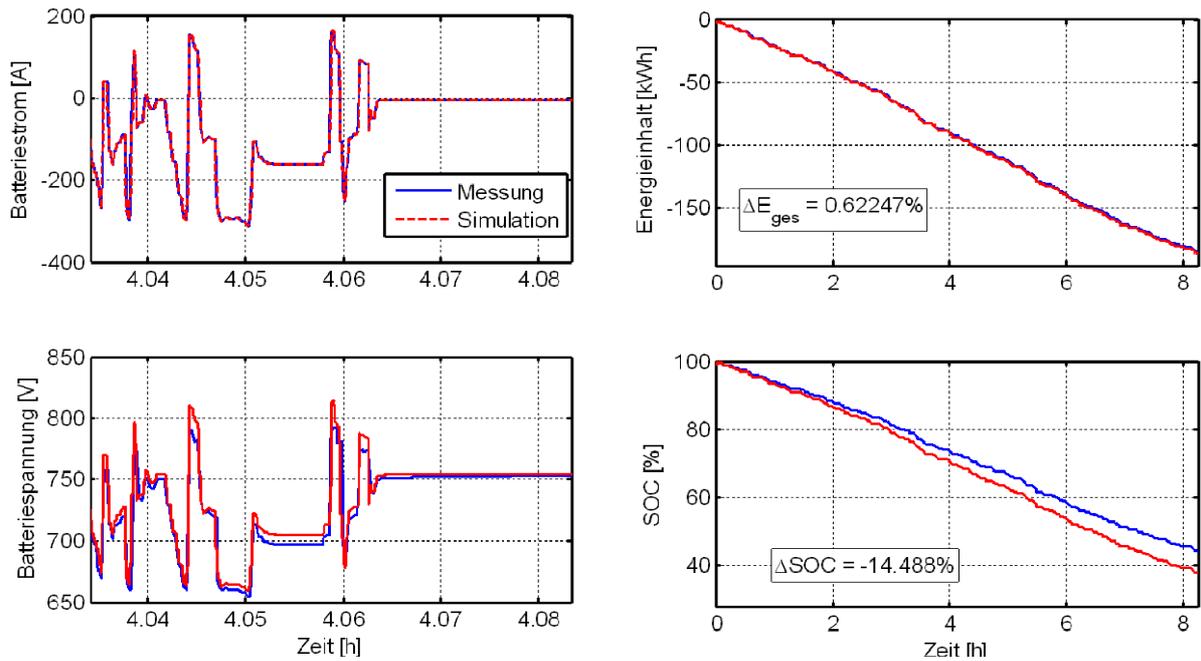


**Abbildung 56:** Entwicklung und Validierung des Batteriemodells

Ausgehend von Batteriedaten einer in der ika-Datenbank vorhandenen vergleichbaren Batterie wurde ein Basismodell (vB0) aufgebaut und mit den bekannten Werten der zu untersuchenden Batterien parametrisiert. Auf Grundlage eines realen Fahrzyklus wurde die Leistungsanforderung an die Batterie ermittelt. Aus dem Modell ergab sich damit ein Lastprofil der Batterie, das als Referenzprofil für die Prüfstandsversuche verwendet wurde.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf den Batterietyp 2, gelten jedoch analog für alle zu untersuchenden Batterien: Mit dem ermittelten Lastprofil durchlief die Batterie verschiedene Programme auf dem Prüfstand, aus denen die noch unbekanntenen Kennwerte wie Innenwiderstand und Leerlaufspannung in Abhängigkeit des SOC, sowie Kapazitäten und Wirkungsgrade bestimmt wurden. Mit diesen Kennwerten wurde das Basis-Batteriemodell bedatet, so dass ein erstes, batteriespezifisches Modell (vB1) zur Verfügung stand.

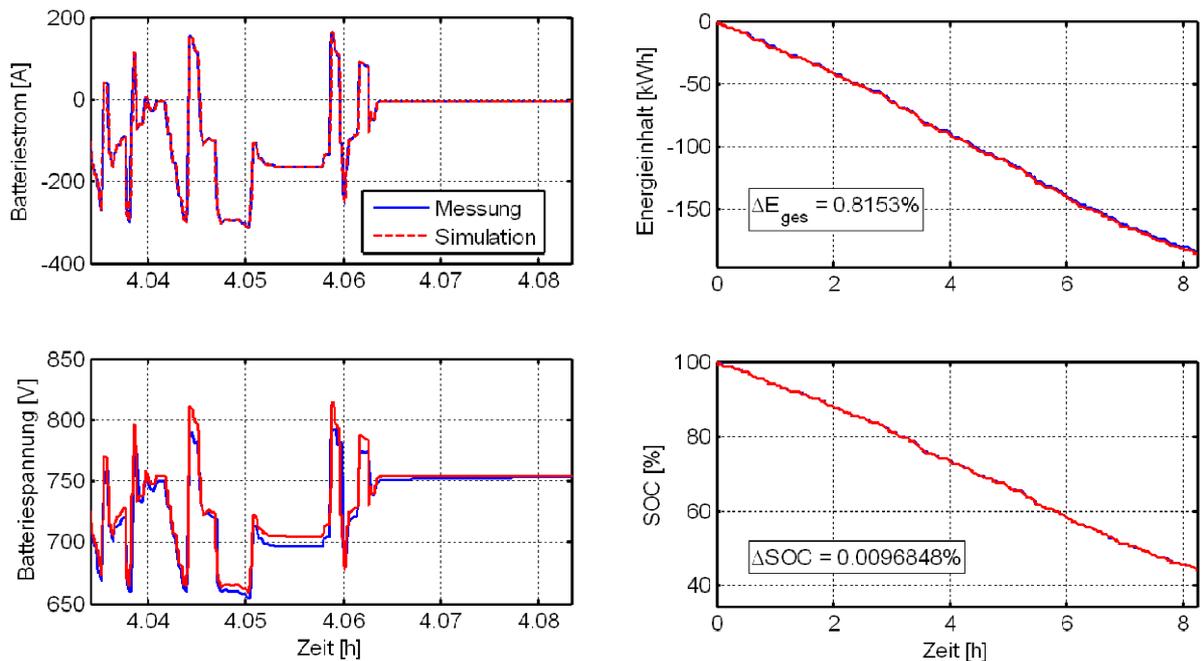
Eine Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse des Batteriemodells vB1 mit den auf dem Prüfstand ermittelten Messwerten für Strom, Spannung, Energieinhalt und Ladezustand ist in **Abbildung 57** dargestellt. Der Batteriestrom dient als Eingangsgröße für das Modell, weshalb hier eine exakte Überdeckung von Simulation und Messung gegeben ist.



**Abbildung 57:** Vergleich Messung und Simulation Batteriemodell vB1

Im Batteriemodell wird der Ladezustand mit Hilfe der in AP 4.4 ermittelten Werte für die Kapazität in Abhängigkeit vom Entladestrom berechnet. Nach dem ca. achtstündigen Prüfprogramm weisen die Simulationsergebnisse gegenüber den Messdaten eine Abweichung von -14,5 % auf. Der Energieinhalt wird durch Integration des Produkts aus Spannung und Strom berechnet. Aufgrund der Abweichungen von Simulation und Messung bei der Spannung ergibt sich hierbei eine Abweichung von 0,62 % (bezogen auf einen Anfangsenergiegehalt von 0 kWh).

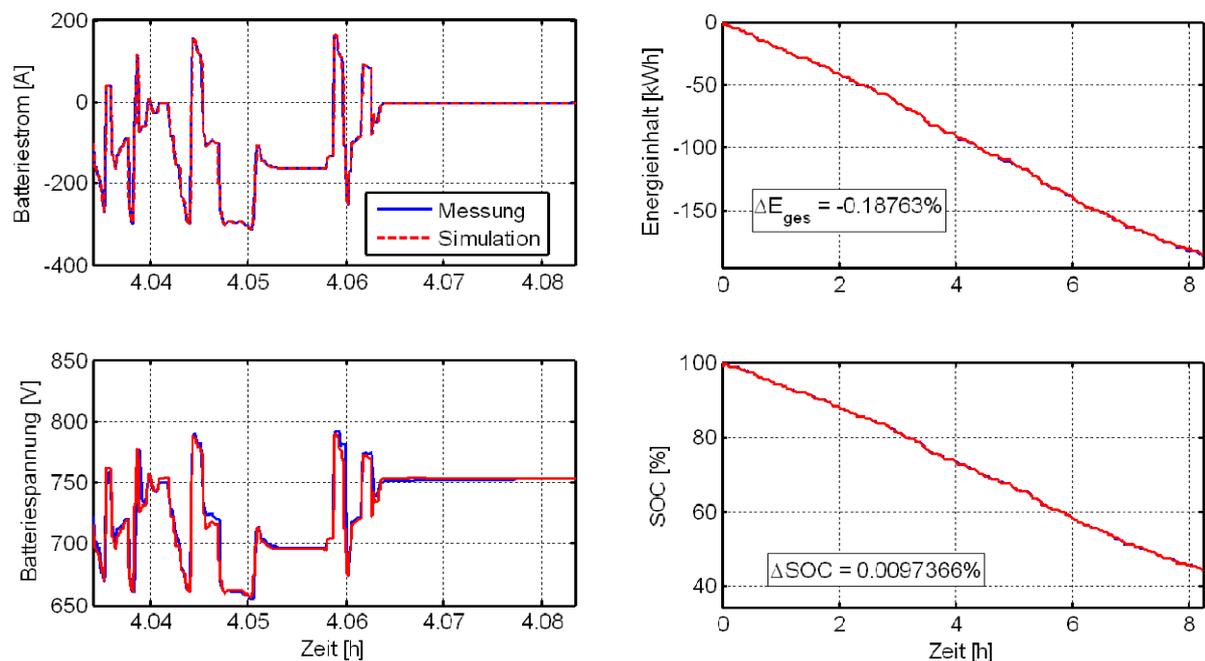
Das Batteriemodell wurde zunächst hinsichtlich der Energiebilanz optimiert. Durch angepasste Werte für die entladestromabhängige Kapazität weisen die Simulationsergebnisse des Batteriemodells vB2 nun eine sehr gute Überdeckung mit den Messwerten beim Ladezustand auf. **Abbildung 58** zeigt den Vergleich der Messwerte mit den Simulationsergebnissen des Batteriemodells vB2.



**Abbildung 58:** Vergleich Messung und Simulation Batteriemodell vB2

Der Verlauf der Batteriespannung in der Simulation liegt verglichen mit den Messwerten weiterhin zu hoch. Die daraus resultierende Abweichung beim Energieinhalt nach Beendigung des Prüfprogramms beträgt ca. 0,82 %.

Das Batteriemodell wurde daher weiter modifiziert, um eine gute Überdeckung der Spannungsverläufe von Simulation und Messung und damit eine geringe Abweichung beim Energieinhalt zu erreichen. Durch die Einführung eines stromabhängigen Innenwiderstands konnte der simulierte Spannungsverlauf dem im Prüfprogramm gemessenen Verlauf sehr gut angenähert werden. Die mit dem Batteriemodell vB3 ermittelte Abweichung beim Energieinhalt beträgt daraufhin -0,19 %. Für eine Verwendung im Fahrzeugmodell ist das Batteriemodell somit hinreichend validiert. Die Ergebnisse der Simulation im Vergleich zu den Messwerten sind in **Abbildung 59** dargestellt.



**Abbildung 59:** Vergleich Messung und Simulation Batteriemodell vB3

### Validierung Antriebsstrang

Die Validierung des Antriebsstrangmodells erfolgte anhand realer Fahrzyklen. Um die erforderlichen Messgrößen aufnehmen zu können, wurden die Fahrzeugsteuerung und die Navigationssoftware modifiziert sowie die Daten-Logger für den Einbau vorbereitet. Die Daten-Logger werden jeweils an einen UMTS-Router gekoppelt, so dass die Daten während des Betriebs ausgelesen werden konnten.

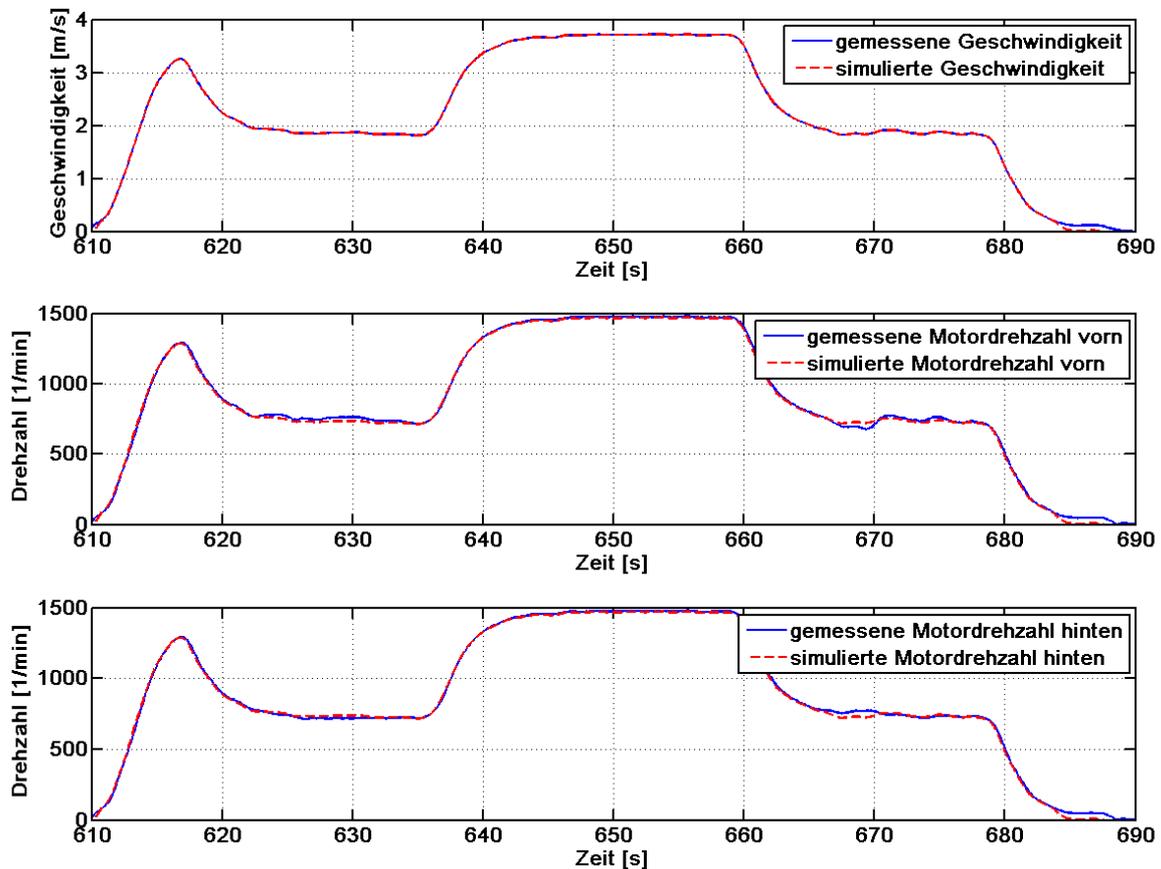
Für die Validierung wurden von GPT folgende Daten bereitgestellt:

- Positionsdaten des AGV in x- und y-Koordinaten
- Geschwindigkeit des AGV
- Zuladung des AGV
- Drehzahlen der Antriebsmotoren
- Spannung der Batterie
- Entladestrom der Batterie

Aus den Positionsdaten des AGV wurden mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate die Lenkwinkel für die Vorder- und Hinterachse ermittelt. Diese dienen zusammen mit der

Fahrzeuggeschwindigkeit und der Zuladung als Eingangsdaten für die Validierungssimulationen. Die in den Simulationen berechneten Verläufe für die Fahrzeuggeschwindigkeit, die Drehzahlen der Antriebsmotoren sowie die Spannung und den Strom der Batterie wurden dabei mit den gemessenen Werten verglichen.

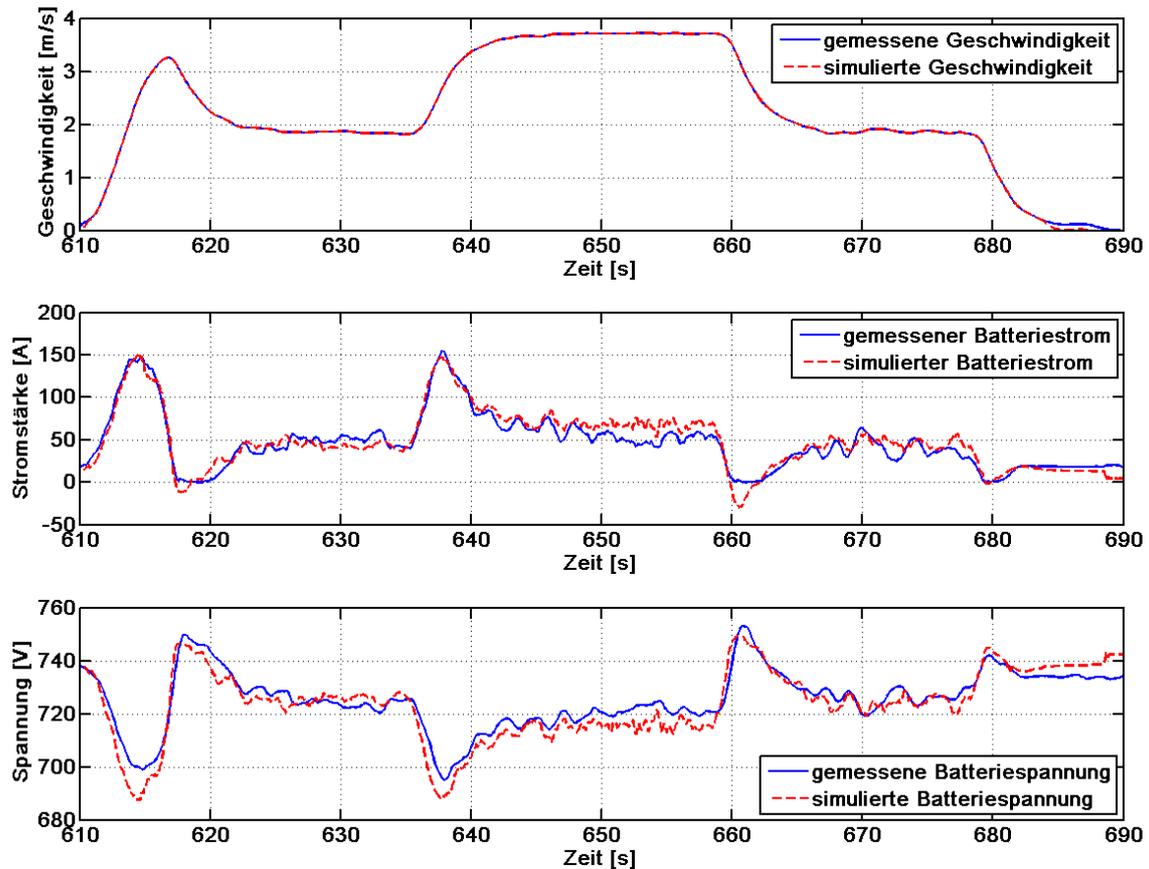
**Abbildung 60** zeigt in einem Ausschnitt die Verläufe von realer und simulierter Geschwindigkeit des Fahrzeugs sowie von den Drehzahlen der Antriebsmotoren für eine ausgewählte Messfahrt.



**Abbildung 60:** Validierung der Fahrgeschwindigkeit und der Antriebsdrehzahlen

Es ist zu erkennen, dass die simulierte Fahrzeuggeschwindigkeit in dem betrachteten Ausschnitt stets mit der realen Fahrzeuggeschwindigkeit übereinstimmt. Diese Übereinstimmung ist für den gesamten Fahrzyklus gegeben. Der Verlauf der simulierten Motordrehzahlen entspricht im Wesentlichen ebenfalls den Messwerten. Die geringen Abweichungen sind durch den geschwindigkeits- und lastabhängigen dynamischen Reifenhalmmesser zu erklären, da das hierfür in der Simulation hinterlegte Kennfeld nicht alle Zustände umfasst.

**Abbildung 61** zeigt für den gleichen Ausschnitt die gemessenen und simulierten Verläufe des Batteriestroms und der Batteriespannung. Sowohl für den Strom als auch für die Spannung zeigen die Verläufe eine sehr gute Übereinstimmung.



**Abbildung 61:** Validierung des Batteriestroms und der Batteriespannung

Zu erkennen ist, dass der simulierte Batteriestrom in den Verzögerungsphasen bei 617 s und 660 s negativ wird, während der gemessene Strom auf null zurückgeht. Bei diesen Verzögerungen wird die kinetische Energie des Fahrzeugs rekuperiert und in die Batterie zurückgespeist. Die Rekuperation erfolgt auch im realen Fahrzeug, die dort installierte Messtechnik konnte jedoch keine negativen Ströme aufzeichnen. Für die energetische Validierung wird daher die Energiemenge herangezogen, die der Batterie entnommen wird. In **Tabelle 12** werden für zehn verschiedene Messfahrten die gemessenen und simulierten Werte für die der Batterie entnommene Energiemenge gegenübergestellt. Zudem wird die prozentuale Abweichung der Werte angegeben.

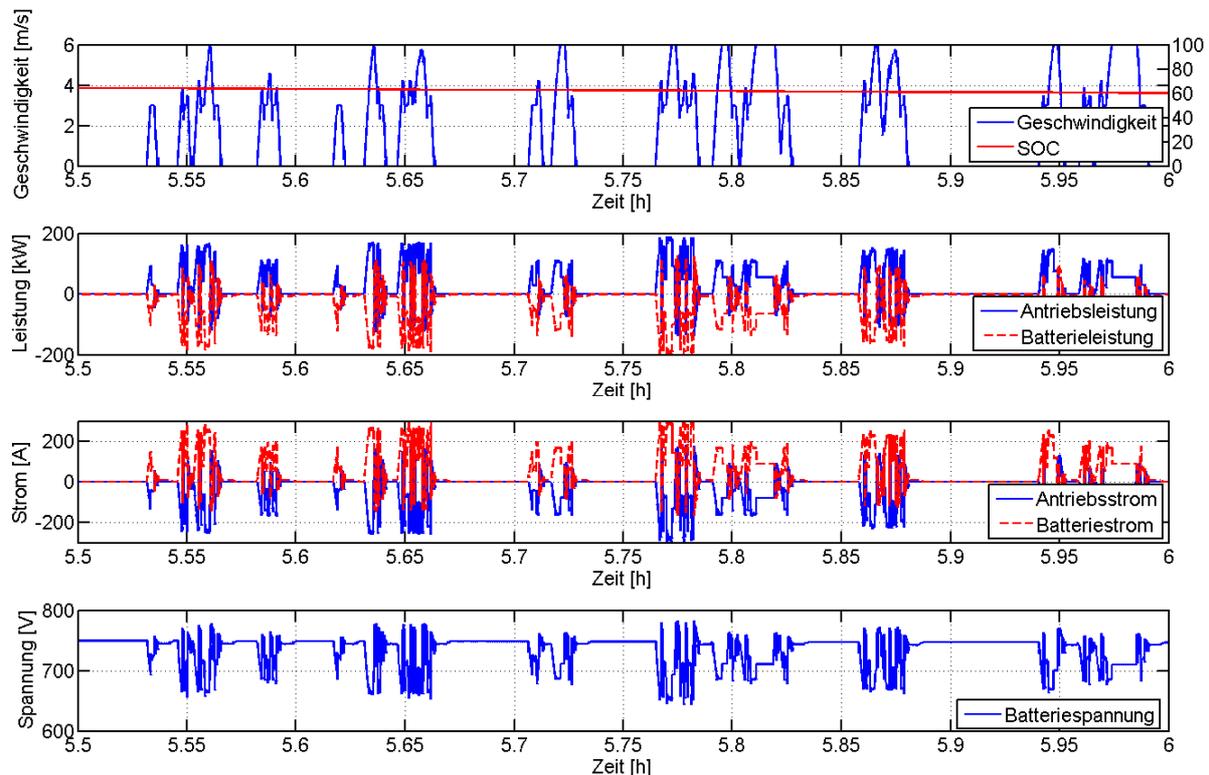
**Tabelle 12:** Validierung der der Traktionsbatterie entnommenen Energiemenge

Messfahrt	gemessene Energiemenge [kWh]	simulierte Energiemenge [kWh]	Abweichung [%]
AGV85_2	7,03	6,80	3,27
AGV85_3	2,23	2,11	5,22
AGV85_4-1	11,75	11,95	-1,74
AGV85_4-2	16,90	17,77	-5,10
AGV85_5	18,03	19,00	-5,39
AGV85_5x	21,63	23,33	-7,84
AGV85_6x-1	16,30	17,44	-6,98
AGV85_6x-2	11,72	12,56	-7,09
AGV85_7	14,77	15,74	-6,56
AGV85_2	11,37	12,09	-6,39

Die durchschnittliche Abweichung der simulierten zu den gemessenen Werten für die aus der Batterie entnommenen Energiemengen beträgt 3,86 %. Es zeigt sich, dass das Simulationsmodell das Verhalten des realen Fahrzeugs mit guter Genauigkeit abbilden kann.

### Zusammenfassung Simulationsergebnisse

Mit dem validierten Simulationsmodell ist es möglich, den Energiebedarf des Batterie-AGV für verschiedene Einsatzszenarien simulativ zu ermitteln. Aus Terminalsimulationen gewonnene mehrstündige Fahr- und Lastprofile können damit energetisch bewertet werden. Es zeigt sich, dass das Batterie-AGV in der gewählten Auslegung in der Lage ist, im Terminalbetrieb bei Geschwindigkeiten von bis zu 6 m/s und Lasten bis zu 60 t mehr als acht Stunden ohne Batteriewechsel betrieben werden kann. Nach diesem Zeitraum beträgt der Ladezustand der Batterie knapp 50 %. **Abbildung 62** zeigt einen Ausschnitt aus einem Terminalzyklus. Dargestellt sind die Fahrgeschwindigkeit, der SOC, die Antriebs- und Batterieleistungen sowie –ströme und die Batteriespannung.



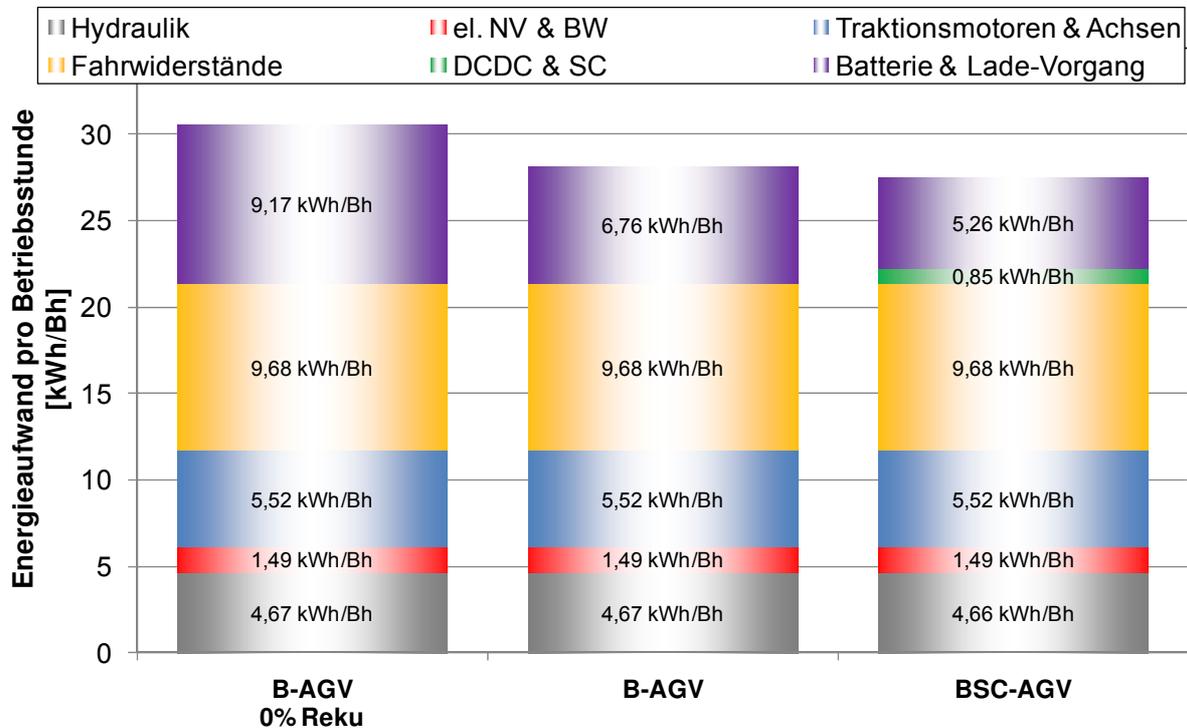
**Abbildung 62:** Ausschnitt Terminalsimulation

Die ermittelten Werte erlauben es zudem, Lebensdauerberechnungen für die Antriebskomponenten durchzuführen oder Flottenenergiebedarfe zu ermitteln, ohne aufwendige und kostenintensive Versuche durchzuführen. Weiterhin können verschiedene Parameter oder Komponenten geändert oder getauscht werden, um Auswirkungen auf das Fahrzeugverhalten und die Energieeffizienz zu beurteilen. Anpassungen an der Regelung der Komponenten sind ebenso möglich, so dass verschiedene Betriebsstrategien verglichen werden können.

### AP 5.4: Dimensionierung SuperCaps (GPT, ika)

Bei einer Voruntersuchung zum Einsatz eines SuperCaps als weiterer Energiespeicher zusätzlich zur Batterie wurde das am ika entwickelte Simulationsmodell um ein Kondensatormodell erweitert. Dieses umfasst einen SuperCap mit einer Kapazität von 31,5 F und einer Nennspannung von 256 V. Die Dauerleistung des Moduls beträgt ca. 50 kW. Der Energieinhalt des Moduls liegt bei 62,72 Wh, was in etwa der rekuperierbaren Energiemenge des Fahrzeugs bei 60 t Beladung und 3 m/s entspricht. Um die Spannung des SuperCap-

Moduls von 256 V auf die Zwischenkreisspannung anzuheben, wurde weiterhin ein DC/DC-Umrichter im Modell implementiert. Zur Beurteilung des energetischen Vorteils dieses kombinierten Energiespeichers gegenüber der ausschließlichen Verwendung einer Bleibatterie wurden mehrere Simulationen bei ansonsten gleicher Antriebskonfiguration durchgeführt. **Abbildung 63** zeigt den durchschnittlichen Energieaufwand pro Betriebsstunde für ein AGV mit Bleibatterie mit und ohne Rekuperation sowie für ein AGV mit Bleibatterie und SuperCap im Vergleich.



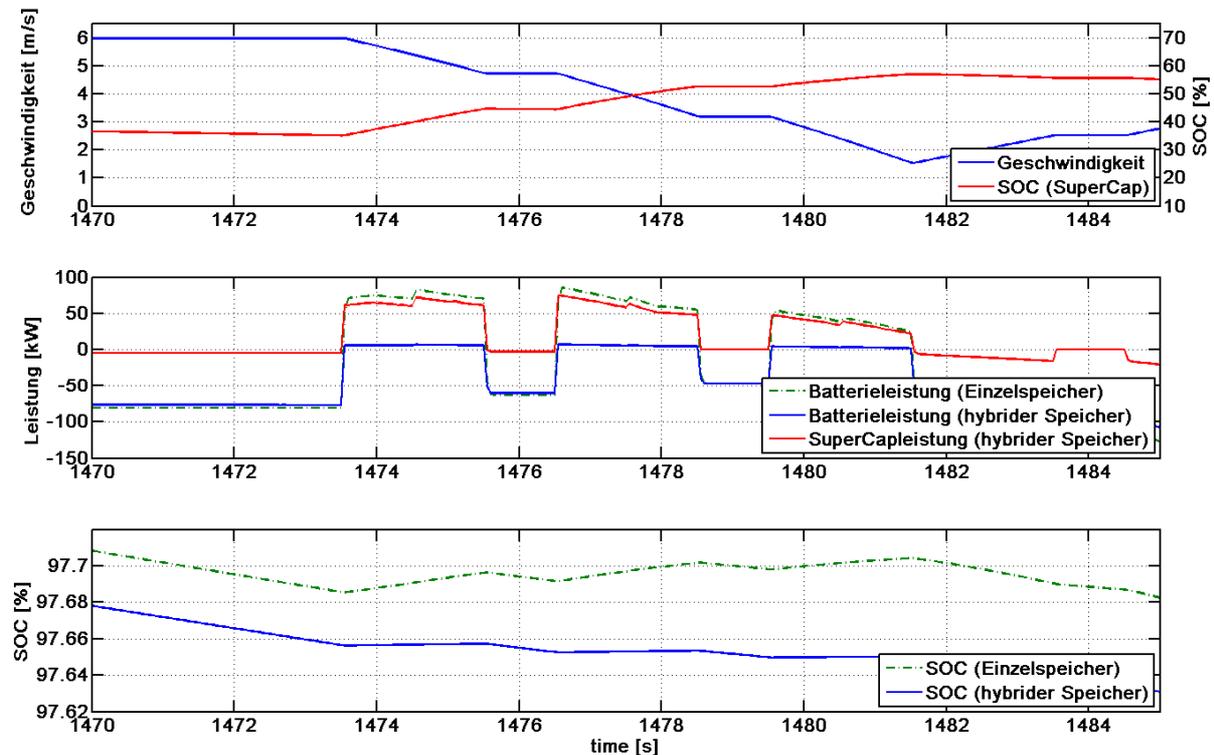
**Abbildung 63:** Vergleich Batterie und Batterie/SuperCap-System

Der Energieaufwand zur Überwindung der Fahrwiderstände sowie zum Betrieb der Nebenverbraucher und die Verluste in den Komponenten sind für alle Fahrzeuge identisch. Durch die Rückspeisung der kinetischen Energie des Fahrzeugs in die Bleibatterie kann der Energieaufwand gegenüber der Bleibatterie ohne Rekuperationsfähigkeit um 2,41 kWh/Bh verringert werden. Auf den Gesamtenergieaufwand bezogen ergibt sich damit eine Verringerung um 7,9 %. Durch den kombinierten Energiespeicher verringert sich der Energieaufwand in der Bleibatterie um weitere 1,50 kWh/Bh. Die im DC/DC-Umrichter des SuperCaps anfallende Verlustleistung erhöht jedoch den Energiebedarf. Der Gesamtenergieaufwand des kombinierten Energiespeichers verringert sich daher lediglich um weitere 2,3 %, bezogen auf die rekuperationsfähige Bleibatterie. Durch eine andere Dimensionierung des SuperCaps ist keine Erhöhung der rekuperierbaren Energiemenge und damit keine Verringerung des Gesamtenergieaufwands zu erwarten, weshalb an dieser Stelle keine weiteren Untersuchungen durchgeführt wurden.

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse und der daraufhin genehmigten Änderung des Arbeitsplans wurde durch den Projektpartner GPT bezüglich des Einsatzes von SuperCaps keine über die im AP 1.7 hinaus gehenden Arbeiten verrichtet.

### AP 5.5: Entwicklung und Optimierung einer Betriebsstrategie für den hybriden Energiespeicher aus SuperCaps und Batterien (ika)

Die Betriebsstrategie wurde so ausgelegt, dass die kinetische Energie des Fahrzeugs beim Bremsen ausschließlich durch den SuperCap rekuperiert wird, der diese bei anschließenden Beschleunigungsvorgängen wieder als Antriebsenergie bereitstellt. In **Abbildung 64** ist für eine Abbremsung der Verlauf der Batterieleistung des reinen Batterie-AGV im Vergleich zu den Verläufen der Batterie- und der SuperCap-Leistung des AGV mit hybridem Energiespeicherkonzept dargestellt.



**Abbildung 64:** Vergleich Rekuperation mit und ohne SuperCap

Die implementierte Betriebsstrategie regelt die Leistung der Batterie beim hybriden Energiespeicherkonzept auf null. Daher erfolgt im Fahrbetrieb keine Ladung der Batterie. In der Abbildung ist zu erkennen, dass mit der Bleibatterie als Einzelspeicher bereits ein großer Teil der kinetischen Energie rekuperiert werden kann. Durch den zusätzlichen SuperCap erhöht sich die rekuperierbare Energiemenge nicht, es sinkt jedoch wie beschrieben der Gesamtwirkungsgrad des Antriebssystems und der Energieaufwand für den Betrieb steigt. Auf eine Optimierung der Betriebsstrategie für das Fahrzeug mit hybridem Speicherkonzept wurde daher verzichtet, da hierdurch keine Effizienzsteigerungen zu erwarten sind.

### AP 5.6: Validierung des Simulationsmodells mit hybridem Energiespeicherkonzept (ika)

Aufgrund der in AP 1.7 gewonnenen Erkenntnisse und der daraufhin genehmigten Änderung des Arbeitsplans entfällt dieses Arbeitspaket.

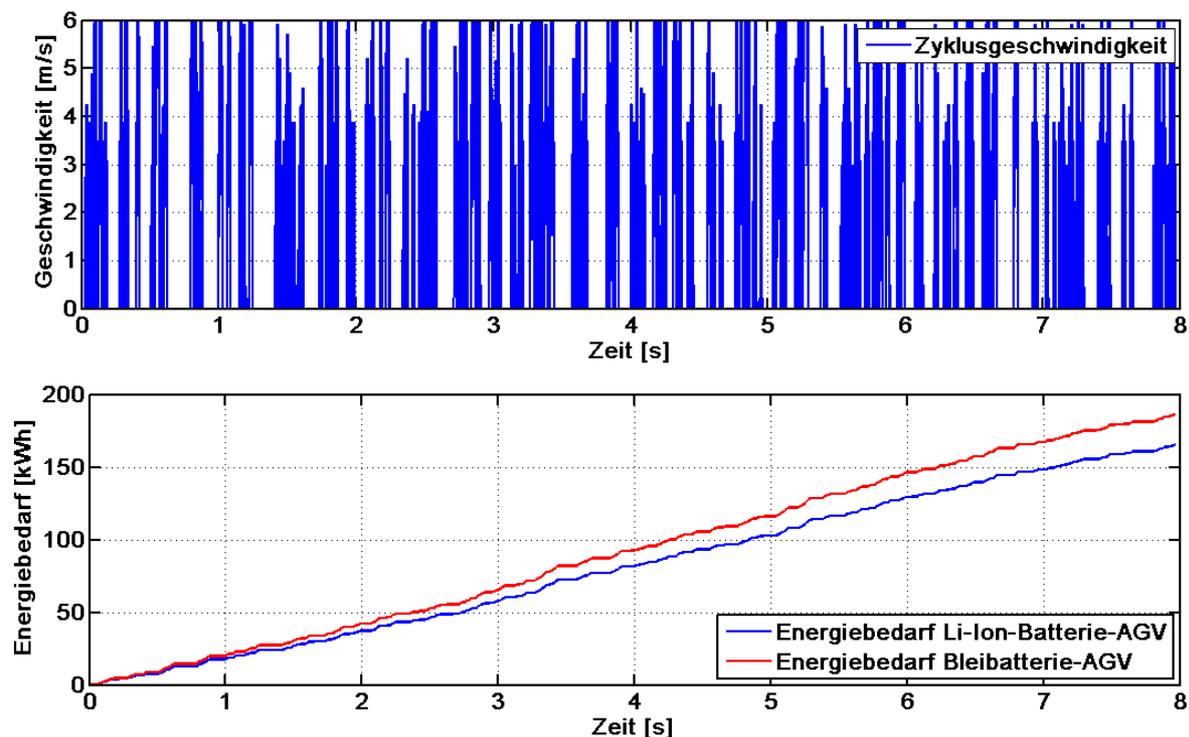
### 3.6 APG 6: Alternative Batteriesysteme

#### AP 6.1: Untersuchung eines Li-Ion Batteriesystems (GPT, ika)

Innerhalb des Projekts werden Blei-Säure-Batterien eingesetzt, die sich seit vielen Jahren im industriellen Einsatz von Flurförderzeugen bewährt haben. Gegenüber der Li-Ion-Technologie weist dieser Batterietyp eine geringere Leistungs- und Energiedichte auf, zeichnet sich aber durch eine deutlich bessere Wirtschaftlichkeit und ein hohes Maß an Standardisierung aus.

Um das energetische Einsparpotential einer Li-Ion-Batterie gegenüber einer Bleibatterie abschätzen zu können, wurde das am ika entwickelte Simulationsmodell des Batterie-AGV um ein Li-Ion-Batteriemodell erweitert. Dieses ist aus mehreren Modulen mit je 200 seriell verschalteten Einzelzellen à 3,6 V Nennspannung aufgebaut, deren Kennwerte aus Prüfstandsmessungen des ika bekannt sind. Die Nennspannung und der nominale Energieinhalt der Li-Ion-Batterie entsprechen damit den Werten der Bleibatterie. Die Masse des Batteriemoduls ist um ca. zwei Drittel geringer im Vergleich zur Bleibatterie, wodurch sich das Fahrzeuggewicht des Li-Ion-Batterie-AGV um ca. 25 % verringert.

In den Simulationen mit verschiedenen Lastprofilen ergab sich für das AGV mit Li-Ion-Batterie im Durchschnitt ein um ca. 17 % geringerer Energiebedarf gegenüber dem AGV mit Bleibatterie. In **Abbildung 65** sind die unterschiedlichen Verläufe für die Energiebedarfe des Bleibatterie-AGV und des Li-Ion-Batterie-AGV über einen achtstündigen Zyklus dargestellt.



**Abbildung 65:** Vergleich Energiebedarf Bleibatterie- und Li-Ion-Batterie-AGV

Der geringere Energiebedarf des Li-Ion-Batterie-AGV ist auf zwei Faktoren zurückzuführen: die geringere Masse des Fahrzeugs und den besseren Wirkungsgrad der Li-Ion-Batterie. Um den Einfluss der verringerten Fahrzeugmasse auf den geringeren Energiebedarf abzuschätzen, wurden zusätzlich Simulationen mit einem mit Li-Ion-Batterie ausgerüsteten AGV durchgeführt, das jedoch die Leermasse des Bleibatterie-AGV besitzt. Hier ergibt sich ein um ca. 7 % geringerer Energiebedarf gegenüber dem Bleibatterie-AGV. Der Einfluss des geringeren Rollwiderstands aufgrund der geringeren Fahrzeugmasse hat somit einen

größeren Anteil an der besseren Energiebilanz als die Wirkungsgradverbesserung der Li-Ion-Batterietechnologie.

Aufgrund der Vielzahl von Entwicklungsaktivitäten im Bereich von Li-Ion-Batterien wurde durch den Projektpartner GPT der aktuelle Stand der Technologien bei Batterieherstellern und -lieferanten für industrielle Anwendungen abgefragt und zusammengetragen. Von zwei Herstellern bzw. Lieferanten konnten ausreichende technische Daten erhalten werden, um eine Vorauslegung einer Li-Ion Batterie inklusive eines ersten konstruktiven Entwurfs für die Anwendung im AGV durchzuführen.

Als wichtige Randbedingung für die beiden Entwürfe wurde die vollständige Kompatibilität mit dem Batterie-AGV-System gefordert. Das heißt, dass eine Li-Ion-Batterie sowohl aus mechanischer als auch elektrischer Sicht in das derzeitige Batterie-AGV passen muss. Dies setzt eine ähnliche Spannungslage sowie feste konstruktive Vorgaben für die Abmessungen der Traktionsbatterie voraus. Die Positionen der Aufnahmepunkte im Fahrzeugchassis und für den Batteriemanipulator sind baugleich mit denen der Blei-Säure-Batterie auszuführen. Die Anordnung der einzelnen Zellen bzw. Module wurde so gewählt, dass eine übersichtliche Verschaltung entstanden ist. Die beiden Varianten werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Der Hersteller der Batterien für die Variante 1 bietet Module mit einer Nennspannung von 24 V und einer Kapazität von 55 Ah an, die zu einer größeren Batterie zusammengeschaltet werden können. Die Module beinhalten bereits ein Batteriemanagementsystem (BMS), das auch für die Verschaltung von mehreren Modulen geeignet ist.

Da die Nennspannung von 24 V laut Datenblatt erst gegen Ende der Entladung auftritt, sollen bei dieser Variante 27 Module in Reihe geschaltet werden, was einer Nennspannung von nur 648 V entspricht. Die mittlere Spannungslage im realen Betrieb dürfte jedoch deutlich höher liegen und der Spannungslage der derzeit eingesetzten Blei-Säure-Batterie ähnlich sein. Um eine ausreichende Kapazität zu erhalten müssen Module auch parallel geschaltet werden. Der vorhandene Bauraum des vorhandenen Batterietragrahmens ermöglicht die Installation von 8 parallel geschalteten Modulen, so dass insgesamt eine Batterie mit einer Kapazität von 440 Ah zur Verfügung steht.

Ein Entwurf der Variante 1 ist in der **Abbildung 66** dargestellt. Dabei sind in Analogie zur eingesetzten Bleibatterie zunächst 27 Module in einem Batterietrog mechanisch zusammengefasst und elektrisch in Reihe geschaltet. Insgesamt werden dann 8 dieser Batterietröge in den Batterietragrahmen eingesetzt und in einer Parallelschaltung elektrisch verbunden. Weiterhin ist in der Abbildung die bekannte Multikupplung dargestellt, so dass auch diese Batterie in das Batterie-AGV ohne weitere Anpassung eingesetzt werden kann.



**Abbildung 66:** Li-Ion Batterie - Entwurf 1

Da Batterien mit der Li-Ion-Technologie keine Gasung während des Lade- oder Entladevorgangs hervorrufen, können diese zum Schutz vor Feuchtigkeit und

Verschmutzung mit einer festen Abdeckung versehen werden, wie in gezeigten Modell dargestellt ist. Um das Gewicht der Abdeckung gering zu halten, kann diese auch aus Leichtbaumaterialien wie z.B. faserverstärktem Kunststoff hergestellt werden. Dies hätte den Vorteil, dass auf die seitliche Batterieabdeckung am Fahrzeug in Form der eingesetzten aktiven Rolltür verzichtet werden könnte.

Ein weiterer Hersteller von Li-Ion-Batterien für industrielle Anwendungen bietet große Traktionsbatterien an, die aus einzelnen Zellen mit 3,2 V Nennspannung und 500 Ah Kapazität konfektioniert werden. Bei dieser Variante kann die Batterie durch eine reine Reihenschaltung von 200 Zellen aufgebaut werden. In dem in **Abbildung 67** dargestellten Entwurf sind jeweils 20 Zellen in einen Batterietrog installiert, von denen wiederum 10 auf dem modifizierten Batterietragrahmen angeordnet sind.



**Abbildung 67:** Li-Ion Batterie - Entwurf 2

Auch bei dieser Variante kann die Batterie mit einem festen Deckel ausgestattet werden, der die Batterie vor Feuchtigkeit und Verschmutzung schützt. Die Aufhängung und Kontaktierung der Batterie im Fahrzeug ist identisch mit der derzeit eingesetzten Blei-Säure-Batterie.

In **Tabelle 13** sind die wichtigsten technischen Daten der derzeit eingesetzten Blei-Säure-Batterien und der beiden Varianten mit Li-Ion-Batterien gegenübergestellt. Aus den Werten wird ersichtlich, dass Li-Ion-Batterien mit einer vergleichbaren Nutzenergie nur etwa ein Drittel der Masse der derzeit eingesetzten Blei-Säure-Batterie aufweisen. Die Massen der Batterietröge und der Tragrahmen sind in dieser Betrachtung nicht enthalten, diese würden sich aber in einem ähnlichen Verhältnis reduzieren. Die von GPT erstellten Varianten decken sich mit den Annahmen des Projektpartners ika aus dem Simulationsmodell für ein Fahrzeug mit Li-Ion-Batterie.

Bei den vorgestellten Varianten ist zu beachten, dass die Gespräche mit den Herstellern nur so weit vorangetrieben wurden, dass diese die Machbarkeit einer derartigen Batterie bestätigen konnten. Keiner der Hersteller hat bislang eine Batterie in dieser Größenordnung aufgebaut oder getestet, so dass die Dimensionierung allein auf Datenblättern und nicht auf Erfahrungswerten beruht. Darüber hinaus wurden keine konstruktiven Details wie die Umsetzung der Verschaltung, elektrische Sicherheitsabstände oder die Anbindung an die Multikupplung diskutiert. Eine aktive Temperierung wurde bei beiden Varianten als für nicht erforderlich befunden.

Abschließend kann für den möglichen Einsatz einer Li-Ion-Batterie zusammengefasst werden, dass der Energiebedarf der Fahrzeuge aufgrund der geringeren Batteriemasse und des besseren Wirkungsgrads der Batterien deutlich reduziert werden kann, laut Simulationsmodell um 17 %. Prinzipiell sind Zellen oder Module am Markt vorhanden, aus denen eine Traktionsbatterie aufgebaut werden kann. Eine detaillierte Konstruktion der mechanischen und elektrischen Komponenten wurde nicht durchgeführt. Für den speziellen Einsatz der Containertransporter im Hafen sind jedoch gerade diese Detailuntersuchungen

wichtig, da die besonderen Einsatz- und Umgebungsbedingungen der Fahrzeuge beachtet werden müssen.

**Tabelle 13:** Vergleich Traktionsbatterien

	<b>AGV-Batterie 1</b>	<b>AGV-Batterie 2</b>	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>
Batterietyp	Blei-Säure-Batterie	Blei-Säure-Batterie	Li-Ion-Batterie	Li-Ion-Batterie
Technologie	Negative Elektrode aus Kupfer-Streckmetall	Lufführung für Elektrolytumwälzung		
<b>Zelle/Modul</b>				
Nennspannung Zelle/Modul	2,0 V	2,0 V	24 V	3,2 V
Nennkapazität	400 Ah	460 Ah	55 Ah	400 Ah
Nutzbarer Energiegehalt	80%	80%	80%	80%
Ladezyklen	1.200	1.200	4.000	2.000
Masse	22,1 kg	25,2 kg	11,0 kg	14,3 kg
<b>Batterie</b>				
- Reihenschaltung	360 Zellen	360 Zellen	27 Module	200 Zellen
- Parallelschaltung	-	-	8 Module	-
Batterienennspannung	720 V	720 V	648 V	640 V
Nennkapazität Batterie	400 Ah	460 Ah	440 Ah	400 Ah
Nutzenergie	230 kWh	265 kWh	253 kWh	205 kWh
Länge Batterie (ohne Träger)	2,67 m	2,67 m	2,39 m	2,34 m
Breite Batterie	2,73 m	2,73 m	2,94 m	2,83 m
Masse Batterie (Tröge und Tragrahmen)	7.956 kg	9.072 kg	2.376 kg	2.860 kg

Neben der technischen Machbarkeit wurden mit den möglichen Batterielieferanten auch die Kosten für eine Li-Ion-Batterie für die Anwendung im AGV diskutiert. Da die Technologie im Bereich industrieller Traktionsanwendungen quasi noch nicht eingesetzt wird und viele Details noch nicht berücksichtigt werden konnten, wurden seitens der potentiellen Lieferanten keine belastbaren Aussagen zu den Kosten gemacht. Die Angebote beziehen sich ausschließlich auf Batterie-Prototypen und können daher nicht für einen fairen Vergleich mit den Blei-Säure-Batterien herangezogen werden. Aus diesem Grund ist zu diesem Zeitpunkt aus Sicht von GPT kein fairer wirtschaftlicher Vergleich zwischen einem AGV-System mit Blei-Säure- und Li-Ion-Batterien möglich.

## 3.7 APG 7: Ökologische Begleitforschung

### 3.7.1 Einführung

Frachtschiffe transportieren große Gütermengen über weite Strecken auf besonders energieeffiziente Weise; damit sind sie eine wichtige Voraussetzung für die heutigen global vernetzten Produktionsprozesse. Durch die starke Technisierung des Umschlagprozesses ist der Containerhafen selbst mittlerweile ein großer Energieverbraucher. Da die Containertransportfahrzeuge bisher nahezu ausschließlich mit Verbrennungsmotoren betrieben wurden, verursacht der Hafen zusätzlich relevante Emissionen von Klimagasen und Schadstoffen. Mit Blick auf den menschengemachten Klimawandel und die Endlichkeit fossiler Ressourcen stellen sich daher ähnliche Fragen wie im Bereich des Straßenverkehrs: Wie können CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionen signifikant gesenkt und gleichzeitig die Abhängigkeit von den endlichen fossilen Ressourcen reduziert werden?

Eine vielversprechende Antwort auf diese Herausforderungen ist die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Sie vermeidet lokale Emissionen beim Fahrzeugbetrieb und ist, verglichen mit verbrennungsmotorischen Antriebssystemen, hocheffizient: Während der Wirkungsgrad bei Verbrennungskraftmaschinen durch grundlegende thermodynamische Gesetze und Materialeigenschaften auf etwa 40 % beschränkt ist, lassen sich mit einem Elektromotor weit über 90 % erreichen. Trotz weiterer Verluste innerhalb des Antriebsstrangs und beim Laden der Batterie ist der elektrische Antriebsstrang in der Regel effizienter.

Daher wurden im Rahmen des Projektes „Batteriebetriebene Schwerlastfahrzeuge im Containerterminal Altenwerder“ vollelektrifizierte Schwerlastfahrzeuge für den Containertransport im Hafen entwickelt und getestet. Die Herausforderung besteht hier vor allem in der Speicherung der elektrischen Energie im Fahrzeug: Die Speicherkapazität der Batterien ist im Vergleich zu Kraftstofftanks begrenzt und die Ladedauer beträgt ein Vielfaches eines Tankvorgangs. Um dennoch eine hohe Verfügbarkeit der Schwerlastfahrzeuge zu erreichen, werden die leeren Batterien in einer Batteriewechselstation innerhalb weniger Minuten gegen geladene Batterien getauscht.

Entscheidend für die ökologische Bewertung des elektrischen Antriebsstrangs ist letztlich die Herkunft des Stroms. Dieser kann aus sämtlichen verfügbaren Primärenergieträgern erzeugt werden, außerdem aus zahlreichen erneuerbaren Energiequellen. So lässt sich die Abhängigkeit von fossilen Ressourcen deutlich verringern.

Erneuerbare Energien sollen in den kommenden Jahrzehnten weltweit und insbesondere in Deutschland massiv ausgebaut werden: Im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ist ein Anteil von 30 % erneuerbaren Stroms als Ziel für 2020 festgeschrieben. Da die Stromerzeugung bei einigen Energiequellen wie Wind- und Sonnenenergie stark fluktuiert, stellt ihre Integration hohe Anforderungen sowohl an die Stromnetze als auch an die Kapazitäten zur Energiespeicherung. Zudem wird es erforderlich sein, den Stromverbrauch (die „Netzlast“) kurzfristig an die aktuell verfügbare Erzeugungsleistung anzupassen.

Der Ladevorgang von Batterien in einer Wechselstation kann teilweise dem Stromangebot angepasst werden, um sowohl Lastspitzen zu reduzieren als auch fluktuierende erneuerbare Energien besser integrieren. Dies wird dadurch erleichtert, dass der Einsatz der Fahrzeuge im Hafetrieb zentral und vollautomatisch disponiert wird. Batterieelektrische Hafefahrzeuge könnten also einen Beitrag zur Stabilisierung des Stromnetzes leisten und somit den weiteren Ausbau erneuerbarer Energien begünstigen.

Um die Umwelteffekte zu quantifizieren wurde im Rahmen der ökologischen Begleitforschung ein ökobilanzieller Vergleich des bisherigen diesel-elektrischen (E-AGV) mit dem neuen batterie-elektrischen Antriebssystem (B-AGV) durchgeführt. Zunächst werden der Untersuchungsrahmen und die Methodik näher erläutert (Kapitel 3.7.2) und anschließend die Ergebnisse für verschiedene Umweltwirkungen über den Lebensweg eines automatisierten Schwerlastfahrzeugs („Automated Guided Vehicle“, AGV) dargestellt und

analysiert (Kapitel 3.7.3). Im Sinne einer ökologischen Optimierung werden in Sensitivitätsbetrachtungen anschließend verschiedene Parameter des elektrifizierten AGV-Systems variiert (Kapitel 3.7.5), z.B. der Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien anstelle von Bleibatterien.

Die geplante Umstellung großer Teile der Stromversorgung auf zeitlich fluktuierende erneuerbare Energieträger wird mittelfristig den Bedarf an Regelenergie deutlich steigern. Der Einsatz von Wechselbatterien in den elektrifizierten AGV wiederum erhöht die Flexibilität bei der Terminierung der Ladezeiten erheblich; somit stellt das batterieelektrische AGV-System prinzipiell einen Verbraucher dar, der seine Stromabnahme an Regelsignale des Stromnetzes anpassen kann. Hier möchte dieser Bericht eine Abschätzung geben, welche ökologischen Vorteile von einer Anpassung der Ladeintervalle an solche Netzsignale zu erwarten sind (Kapitel 3.7.6).

## 3.7.2 Untersuchungsrahmen und Methodik

### 3.7.2.1 Goal and scope

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse der ökologischen Begleitforschung zum Projekt „Batteriebetriebene Schwerlastfahrzeuge im Containerterminal Altenwerder“ vorgestellt. Das Projekt wurde vom 1. Juni 2010 bis 30. September 2011 im Rahmen des Konjunkturpakets II vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit gefördert.

Gegenstand des Projekts sind die Schwerlastfahrzeuge im Containerterminal Altenwerder, auch „Automated Guided Vehicles“ (kurz: AGV) genannt, die die Container zwischen Kai und Containerlager transportieren. Sie werden an den Endpunkten mit entsprechenden Kränen be- und entladen und fahren dazwischen vollautomatisch eine Route, die ihnen durch ein zentrales Computersystem vorgegeben wird. Die Fahrzeuge sind in der Lage, Container von bis zu 60 t Gewicht zu transportieren, rund um die Uhr im Einsatz und kommen daher auf eine Jahresbetriebsdauer von ca. 5500 Stunden.

Im Containerterminal Altenwerder (CTA) waren zu Projektbeginn 84 AGV im Einsatz, von denen 30 Fahrzeuge über einen modernen diesel-Elektrischen Antrieb verfügen (so genannte „E-AGV“). Im Rahmen des BMU-Projekts wurde ein neuer AGV-Typ mit Batterieelektrischem Antrieb entwickelt („B-AGV“) und zwei Exemplare davon über mehrere Monate im Produktivbetrieb getestet. Übergeordnetes Ziel der Begleitforschung ist es, die Umweltwirkungen der unterschiedlichen Antriebssysteme ökobilanziell<sup>3</sup> zu vergleichen. In den Bilanzen zum batterie-elektrischen Antrieb wurde zur besseren Vergleichbarkeit der Systeme eine komplette Umstellung der AGV-Flotte im Containerterminal unterstellt.

Im Sinne einer vergleichenden Untersuchung liegt der Fokus auf den differierenden Aspekten der Antriebskonzepte, die im Detail untersucht werden. Zusätzlich werden auch die absoluten Umweltwirkungen der gemeinsamen Komponenten zumindest überschlägig bilanziert, damit die Effekte sinnvoll eingeordnet werden können.

Da die AGV eine hohe Verfügbarkeit haben müssen, können die Traktionsbatterien nicht im Fahrzeug aufgeladen werden. Es wurde daher im Rahmen des Projektes eine Batteriewechselstation aufgebaut, die die Traktionsbatterien der Fahrzeuge vollautomatisch wechselt und auflädt. Auch diese Wechselstation ist Gegenstand der Untersuchung. Der Bau der AGV-Fahrfläche sowie die Installation der Terminal-Leittechnik werden dagegen vernachlässigt, da die mit ihnen verbundenen Umweltwirkungen im Vergleich zur Gesamtbilanz gering und zudem für beide Antriebskonzepte gleich sind.

---

<sup>3</sup> Es handelt sich dabei jedoch nicht um standardisierte Ökobilanzen nach ISO 14040/14044.

### 3.7.2.2 Funktionelle Einheit

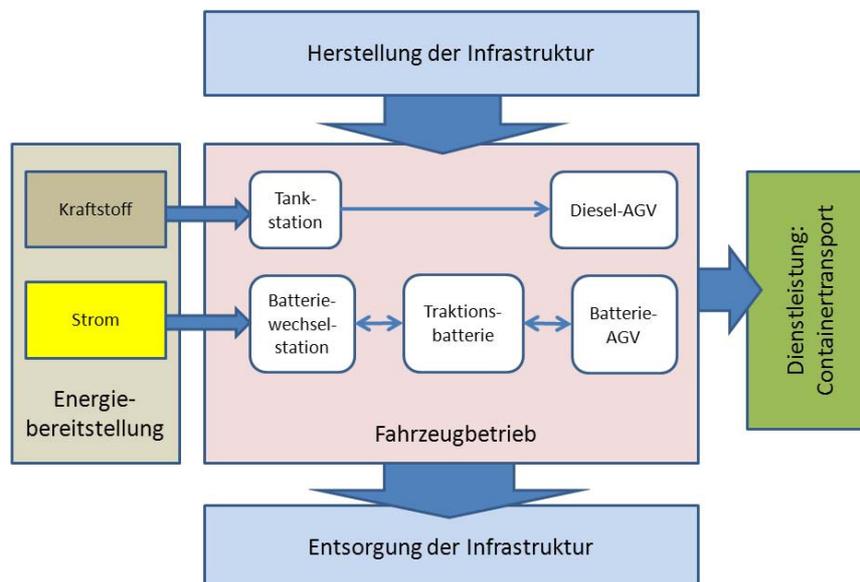
Mit dem Begriff „Funktionelle Einheit“ (FU) wird in Ökobilanzen die Menge an „Nutzen“ des betrachteten Systems bezeichnet, auf die sämtliche Aufwendungen und Lasten bezogen werden. Der Nutzen von AGV ist es, genormte Container von entweder 40‘ oder 20‘ Länge zwischen Kai und Containerlager zu bewegen. Ein AGV kann dabei entweder mit einem 40‘-Container, mit zwei 20‘-Containern, mit nur einem 20‘-Container oder überhaupt nicht beladen sein. Die Container sind zudem in der Regel unterschiedlich schwer.

Leerfahrten tragen nicht direkt zum Nutzen und damit auch nicht zur funktionellen Einheit bei. Zu den beladenen Fahrten lässt sich aus dem AGV-Leitsystem die Zahl der stündlich umgeschlagenen (also über eine Strecke zwischen Kai und Lager transportierten) Container ermitteln. Zudem ist der sogenannte TEU-Faktor (TEU = „twenty-foot equivalent unit“) bekannt, also das Mengenverhältnis zwischen 40‘- und 20‘-Containern.

Als funktionelle Einheit wird in dieser Untersuchung der Transport eines durchschnittlichen Containers über eine einfache Strecke zwischen Kai und Containerlager gewählt. Sowohl der Einfluss der verschiedenen Containergrößen als auch die Auswirkungen unterschiedlicher Beladungen einzelner Container mitteln sich durch die summarische Betrachtung einer großen Zahl von Transportvorgängen heraus. Mithilfe des TEU-Faktors (der bei ungefähr 1,6 liegt) lässt sich die FU bei Bedarf in TEU umrechnen.

### 3.7.2.3 Das AGV-System im Überblick

Für die ökobilanzielle Betrachtung können verschiedene Teilsysteme des AGV unterschieden werden (siehe **Abbildung 68**). Diese lassen sich grob einteilen in die drei Bereiche „Herstellung / Entsorgung der Infrastruktur“, „Energiebereitstellung“ und „Betrieb der Fahrzeuge“. Die ersten beiden greifen wiederum auf weitere Produkte aus der Technosphäre zurück, enthalten also „Vorketten“, die im Rahmen dieses Projekts nur generisch bilanziert werden können.



**Abbildung 68:** Das Ökobilanzmodell des AGV-Systems im Überblick

#### Herstellung des Fahrzeugs und der Infrastruktur

Die Infrastruktur des AGV-Systems besteht

1. aus den Fahrzeugen selbst,
2. aus den verwendeten Energiespeichern und
3. aus den stationären Geräten, die benötigt werden, um die Energiespeicher zu laden.

Beim E-AGV wird der verwendete Dieselkraftstoff mithilfe einer automatischen Tankstation direkt in den Fahrzeugtank gefüllt. Beim B-AGV hingegen stellt der Energiespeicher, nämlich die auswechselbare Batterie, eine eigenständige Einheit dar. Sie wird getrennt bilanziert, da das System prinzipiell mit verschiedenen Arten von Batterien betrieben werden kann und auch die Anzahl der Wechselbatterien eine unabhängige Variable darstellt. Hinzu kommt die Batteriewechselstation inklusive Batterieladepätzen.

Für die Ermittlung der herstellungsbedingten Umweltwirkungen lagen umfangreiche Informationen vom Projektpartner Gottwald zu den verwendeten Komponenten vor. Anhand dieser Daten wurde die Herstellung auf Grundlage von Einheitsprozessen und generischer Materialien aus der Ökobilanzdatenbank [Ecoinvent 2008] sowie einiger zusätzlicher, dem IFEU vorliegenden Industriedaten modelliert. Der Energieeinsatz zur Herstellung der AGV konnte dabei nicht präzise abgegrenzt und damit nicht bilanziert werden. Es ist davon auszugehen, dass der Energieeinsatz für beide Antriebskonzepte in einer ähnlichen Größenordnung liegt und damit in einer vergleichenden Betrachtung vernachlässigt werden kann.

### **Energiebereitstellung**

Ein herkömmliches E-AGV muss typischerweise einmal pro Woche mit Dieselkraftstoff betankt werden. Es handelt sich dabei um rein fossilen Raffinerie-Diesel ohne Beimischung von Biokraftstoffen. Die Modellierung der Raffination erfolgt in UMBERTO über ein am IFEU entwickeltes Raffinerie-Modell, das auch bereits in anderen IFEU-Projekten eingesetzt wurde. Darin ist auch die Bereitstellung des Energieträgers berücksichtigt.

Als Fahrstrom für die B-AGVs wird im Projekt Ökostrom des Projektpartners Vattenfall eingesetzt, der mit dem ok-Power-Label zertifiziert ist [EnergieVision2011]. Zusätzlich wird auch der durchschnittliche deutsche Strommix sowie die Strombereitstellung aus zusätzlichen Windkraftanlagen betrachtet.

Die Bilanzierung der einzelnen Kraftwerke erfolgt mit dem IFEU-Strommaster, einem hoch differenzierten Ökobilanzmodell zur Berechnung von Strombereitstellungsketten. Darin sind die grundsätzlichen Energieträger- und Kraftwerksarten als einzelne Module hinterlegt. Der Strommaster wurde bereits in zahlreichen IFEU-Ökobilanzen verwendet. Die Systemgrenze des IFEU-Strommasters umfasst die gesamte Well-to-Tank-Kette, also

- die Brennstoffvorketten (Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Kokerei- und Hochofengas, Kernbrennelemente, Biomasse)
- die Kraftwerksprozesse zur Stromerzeugung mit Stein- und Braunkohle, Erd-, Koks- und Hochofengas, Biomasse, sowie Kern-, Wasser- und Windkraft
- die Verteilung des Stroms bis zum Verbraucher mit entsprechenden Leitungs- und Umspannverlusten.

Die Aufwendungen der Herstellung von Anlagen werden bei der fossilen und nuklearen Stromerzeugung vernachlässigt und nur bei den Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien berücksichtigt. Hier stellen sie aufgrund der als gegeben angenommen Primärenergie der erneuerbaren Quellen die einzige Ursache von Umweltbelastungen dar. Betrachtet wird dann die Bereitstellung der bedeutendsten Baustoffe (Stahl in verschiedenen Legierungsstufen, div. NE-Metalle, Kunststoffe, Zement, Beton, Bitumen u.a.) sowie die Energieaufwendungen zur Fertigung der Anlagen (Daten nach [Ecoinvent 2008]).

### **Fahrzeugbetrieb**

Um die betriebsbedingten Umweltwirkungen der AGV zu untersuchen, gilt es zunächst, das typische Fahrprofil eines AGV zu charakterisieren. Da durch Unterschiede in den logistischen Betriebsparametern (vor allem beim Auslastungsgrad des Hafens) sehr unterschiedliche reale Fahrzyklen auftreten können, wurde durch die Projektpartner ika und Gottwald ein Referenzzyklus definiert, der in allen wesentlichen Parametern eine typische Situation auf einem Containerterminal widerspiegelt.

Der Projektpartner ika verfügt über ein detailliertes Simulationsmodell beider AGV-Typen, mit dessen Hilfe die Energieverbräuche sowie eine Reihe anderer Parameter für beliebige Zyklen berechnet werden können. Seit Mai 2011 läuft zudem der Feldversuch mit zwei B-AGV im CTA, die dort im realen Produktivbetrieb eingesetzt werden. Die Fahrzeuge sind mit einem Datenlogger ausgestattet, so dass das Fahrzeugmodell des ika sukzessive an den realen Betriebsdaten normiert werden konnte. Die für diesen Bericht verwendete Datenbasis ist auf diese Weise vollständig verifiziert worden, um auch lokale Besonderheiten des CTA berücksichtigen zu können. Beispielsweise wird dort aus betrieblichen Gründen mit einer maximalen Geschwindigkeit von 4,0 m/s gefahren, wodurch sich abweichende Umschlagszahlen und Energieverbräuche ergeben (siehe Abschnitt 3.7.5.2).

Obwohl beim Feldtest nur zwei B-AGV im Einsatz waren, beziehen sich die Umweltbilanzen in diesem Bericht auf die komplette AGV-Flotte des CTA (84 Fahrzeuge) für den jeweils betrachteten Typ. Dies hat insbesondere Auswirkungen auf die Abschreibung der Ladeinfrastruktur sowie auf die Betrachtungen zum gesteuerten Laden in Kapitel 3.7.6.

Durch den engen Projektzeitplan stand für den Feldtest nur ein Zeitraum von etwa drei Monaten zur Verfügung. Es ist daher prinzipiell nicht auszuschließen, dass bei längerem Praxistest Abweichungen von den hier zugrundeliegenden Betriebsdaten auftreten, die z.B. durch Alterungserscheinungen an den Traktionsbatterien oder durch witterungsbedingte Einflüsse entstehen könnten.

#### 3.7.2.4 Betrachtete Umweltwirkungskategorien

Ziele des Projekts aus Umweltsicht sind die vollständige Vermeidung lokaler Emissionen sowie die Reduktion der klima- und schadstoffrelevanten Emissionen über den gesamten Lebensweg des Systems. Vor dem Hintergrund zahlreicher Klimaschutzmaßnahmen auf nationaler wie internationaler Ebene, kommt den Treibhausgasen Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Stickstoffmonoxid (N<sub>2</sub>O, auch Lachgas genannt) in der Diskussion der Ergebnisse in Kapitel 3.7.3 sowie in den Sensitivitätsbetrachtungen (Kapitel 3.7.5) besondere Bedeutung zu. Um Fragen der Energieeffizienz der gesamten Wirkungskette zu thematisieren, wird an einigen Stellen ebenfalls der kumulierte Energieaufwand hinzugezogen.

Zusätzlich zu den Treibhausgasen werden jedoch auch zahlreiche Substanzen mit direkten negativen Wirkungen auf die Natur und die menschliche Gesundheit emittiert (Schadstoffe). Wichtige Schadstoffe sind dabei Partikel (Feinstaub, PM), Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>, bzw. zusammen mit Stickstoffmonoxid (NO) auch als NO<sub>x</sub> geführt), Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoff (HC) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>). Die Substanzen sind dabei für unterschiedliche - teilweise aber sich überschneidende - Wirkungen verantwortlich. Um diese Wirkungen zusammenfassend bewerten zu können, werden 'Umweltwirkungskategorien' verwendet. Diese gewichten die einzelnen Komponenten zu einem einzigen Faktor, der die Stärke der Umweltwirkung beschreibt. Im Einzelnen werden die folgenden Umweltwirkungen bilanziert:

- Die **Klimawirkung** bzw. der Treibhauseffekt steht für die negative Umweltwirkung der anthropogen verursachten Erwärmung der Erdatmosphäre durch Treibhausgasemissionen. Die Berechnung des Treibhauseffekts richtet sich nach den Vorgaben des Intergovernmental Panel on Climate Change ([IPCC 2007]) und erfolgt über das Treibhausgaspotential (Global Warming Potential; GWP) der klimawirksamen Gase mit einem Zeitbezug von 100 Jahren.
- Der **Kumulierte Energieaufwand (KEA)** wird zur primärenergetischen Bewertung des untersuchten Bilanzsystems verwendet. Dabei stellt er nach [Klöpffer & Grahl 2009] nicht im eigentlichen Sinne einen Wirkungsparameter, sondern vielmehr eine Sachbilanzgröße dar. Diese drückt die Summe der Energiemengen aller im System genutzten Primärenergiequellen aus. Dabei umfasst der ‚nicht erneuerbare‘ KEA sowohl den ‚fossilen‘ KEA (Summe aller Verbräuche fossiler Energieträger) als auch

den ‚nuklearen‘ KEA (Berechnung des Uranverbrauch über den verbrauchten Atomstrom und einen Wirkungsgrad von 33 %). Der ‚erneuerbare‘ KEA stellt demgegenüber die Summe der Energiemengen aus erneuerbaren Energiequellen (z.B. Sonne, Wind etc.) dar.

Bei der Berechnung des erneuerbaren KEA von EE-Strom gibt es unterschiedliche Definitionen. [VDI1997] setzt die physischen Abmessungen der EE-Kraftwerke als Bilanzgrenzen an. Danach zählt bei Windkraftanlagen die Energie des durch den Rotorquerschnitt strömenden Windes, bei Photovoltaikanlagen die auf die Modulfläche einfallende Globalstrahlung als Berechnungsgrundlage. Da dies jedoch den Vergleich zwischen verschiedenen EE-Kraftwerkstypen stark verzerrt und gleichzeitig „erneuerbare Primärenergie“ in Form von Wind und Sonne als gegeben angesehen werden kann, wird in dieser Untersuchung für den erneuerbaren KEA die Energieabgabe der EE-Anlagen ins Stromnetz betrachtet.

- **Versauerung** bedeutet eine Absenkung des pH-Wertes und kann sowohl ein natürlicher Prozess sein, als auch durch menschliche Aktivitäten verursacht oder beschleunigt werden. Verantwortlich sind dann vor allem Emissionen von Salzsäure, Schwefeloxiden, Schwefelwasserstoffen, Stickoxiden und Ammoniak. Die Versauerung kann dabei sowohl in Gewässern als auch in Böden (saurer Regen) auftreten und schränkt u.a. das Pflanzenwachstum ein bzw. mindert landwirtschaftliche Erträge. Um die Versauerungswirkung der unterschiedlichen Substanzen für einen Prozess zusammenzufassen, werden  $\text{SO}_2$ -Äquivalente verwendet.
- Die **Feinstaubbelastung** wird als Indikator für negative Wirkungen auf die menschliche Gesundheit durch Aerosole herangezogen. Eine Reihe von internationalen Untersuchungen zeigt, dass eine Erhöhung der Feinstaubkonzentration mit einer starken Erhöhung der Sterblichkeit infolge von Atemwegs- und Herzkreislauferkrankungen einhergeht; Studien international anerkannter Organisationen bestätigen dies (siehe z.B. [IIASA 2005]). Feinstaub bezeichnet dabei Staub, dessen Partikel einen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) aufweisen und wird daher auch als PM10 (Particulate Matter < 10 $\mu\text{m}$ ) bezeichnet. Die Feinstaubbelastung wird durch Addition der Sachbilanzgrößen, ohne Berücksichtigung von Äquivalenzfaktoren, ermittelt. Besonders in Großstädten stellen Feinstaubemissionen ein nicht zu unterschätzendes Problem dar. Zwar trägt der Verkehr zur Feinstaubbelastung im Bundesdurchschnitt weniger als 20 % bei, an den Überschreitungen der Grenzwerte in Ballungsräumen haben Dieselmotoren jedoch einen bedeutenden Anteil.

**Tabelle 14:** Überblick über die betrachteten Wirkungsindikatoren

	Wirkungsindikator	Sachbilanzparameter	Wichtungsfaktor
<b>Klimawirkung</b>	CO <sub>2</sub> -Äquivalente	CO <sub>2</sub> fossil	1
		CH <sub>4</sub>	27,75
		N <sub>2</sub> O	298
<b>Versauerung</b>	SO <sub>2</sub> -Äquivalente	SO <sub>2</sub>	1
		NO <sub>x</sub>	0,7
		NH <sub>3</sub>	1,88
		HCl	0,88
		HF	1,6
			IFEU 2011

### 3.7.2.5 Technische Aspekte

Die ökobilanzielle Modellierung des AGV-Systems wurde mit der Software **UMBERTO** durchgeführt, die vom Hamburger Institut für Umweltinformatik (ifu) entwickelt wird. Mit UMBERTO ist es möglich, komplexe Stoff- und Energieströme nachzuvollziehen und dabei sämtliche relevanten Parameter zu variieren. Die stoffliche Datengrundlage bildet die Datenbank Ecoinvent ([Ecoinvent 2008]), die vom Swiss Center for Life Cycle Assessment betreut wird.

Das für dieses Projekt verwendete Modell setzt auf dem Modell **eLCAR (Electric Car LCA)** auf, das vom ifeu für die Bilanzierung von Elektrofahrzeugen im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte aufgebaut und ständig weiterentwickelt wird. In eLCAR sind die in Abbildung 68 aufgeführten Einheiten, die zur Bereitstellung der funktionellen Einheit (nämlich der Transportleistung) beitragen, als einzelne Module nachgebildet. Jedes Modul ist durch ein- und abgehende Stoff- bzw. Energieströme gekennzeichnet, die in ihrer Gesamtheit die sogenannte Sachbilanz des Systems ergeben. Diese wird anschließend mit spezifischen Wirkungsfaktoren gewichtet, um die Umweltwirkungen in den einzelnen Kategorien zu erhalten.

Die Abgasemissionen der E-AGV wurden mithilfe des „**Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model**“ (**PHEM**) berechnet, dem differenzierte Motorkennfelder zugrunde liegen. Dies erlaubte eine Berücksichtigung der besonderen Betriebssituation der Fahrzeuge im Hafen. Unser Dank geht dafür an Prof. Stefan Hausberger von der TU Graz, der die Berechnungen für uns durchführte.

### 3.7.3 Vergleichende Umweltbilanz der Antriebssysteme

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der vergleichenden Umweltbilanzen über den Lebensweg diesel-elektrischer und batterie-elektrischer AGV dargestellt und interpretiert. Während es sich bei E-AGVs um ein seit Jahren in der Praxis eingesetztes und bewährtes System mit weitgehend optimierter Auslegung handelt, befindet sich das im Projekt eingesetzte B-AGV noch in der Entwicklungsphase. Weitere Einsatz- und Optimierungsmöglichkeiten, z.B. hinsichtlich der Traktionsbatterie und des eingesetzten Fahrstroms sind denkbar. Zur übersichtlichen Darstellung der Ergebnisse werden folgende „Basisszenarien“ definiert:

1. E-AGV
  - Baujahr 2011
  - mit Abgasnachbehandlung (SCR-Katalysator)

- erfüllt die Abgasnorm mobiler Maschinen der Stufe III b [EU 2005] dies entspricht etwa der Stufe Euro-V für Lkw
2. B-AGV (Mix D), betrieben mit durchschnittlichem Strommix
    - geschlossene Blei-Säure-Batterie
    - Fahrstrom entsprechend dem deutschen Erzeugungsmix 2010
  3. B-AGV (OK Power), betrieben mit zertifiziertem Ökostrom
    - Fahrstrom ist zertifiziert mit dem „ok-Power-Label“ [EnergieVision2011]
    - siehe Abschnitt 3.7.4.2 für detaillierte Erläuterungen hierzu
  4. B-AGV (Windkraft), betrieben mit 100 % erneuerbarer Energie aus Windkraft
  5. B-AGV (Li-Ionen), betrieben mit Graustrom
    - Lithium-Ionen-Batterie entsprechend Variante 2 in Kapitel 3.6
    - hypothetisches Szenario; im Feldtest werden keine Li-Ionen-Batterien eingesetzt

Die Nutzungsphase der Bilanzen wurde mit dem von den Projektpartnern ika und Gottwald gemeinsam festgelegten Referenzzyklus (Abbildung 82) modelliert. Die verwendeten Basisannahmen sind in **Tabelle 15** aufgeführt. Es wird stets der Fall einer vollständigen AGV-Flotte (84 Fahrzeuge) des betreffenden Typs im Betrieb bei CTA angenommen.

**Tabelle 15:** Annahmen für die Gesamtbilanz

	E-AGV	B-AGV		Anmerkungen
		Blei	Li-Ionen	
Betriebsstunden / Jahr		5500		
Lebensdauer Dieselmotor [a]	3,5			
Zyklen		1200	2000	Herstellerangaben
Gesamtwirkungsgrad Batterie [%]		73 <sup>1</sup>	85 <sup>2</sup>	<sup>1</sup> Ergebnis Feldversuch <sup>2</sup> Herstellerangabe
Recyclingquote Blei [%]		75 <sup>5</sup>		[EcoInvent 2008]
Gesamtgewicht [t]	26,5	33,5	26,5	
Verbrauch / Stunde	7,2 Liter	14,2 <sup>1</sup>	13,3 <sup>2</sup>	<sup>1</sup> Ergebnis Feldversuch <sup>2</sup> Simulation ika
Ladeplätze / AGV		0,55 <sup>6</sup>		Erwarteter Wert für B-AGV-Flotte

IFEU 2011

### 3.7.3.1 Treibhausgas-Emissionen und Kumulierter Energieaufwand

Ein wesentliches Ziel des B-AGV-Projekts ist die Verringerung des Ausstoßes an Treibhausgasen (THG) über den gesamten Lebensweg der Fahrzeuge. In **Abbildung 69** ist daher der Treibhausgasausstoß für die verschiedenen Basisszenarien dargestellt.

Bei allen Szenarien, mit Ausnahme des windstromgetriebenen B-AGV, wird die Klimabilanz durch die Energiebereitstellung in der Nutzungsphase dominiert. Die Herstellung der Fahrzeuge und Infrastruktur hat demgegenüber nur geringen Einfluss, die Entsorgung spielt praktisch keine Rolle. Die herstellungsbedingten THG-Emissionen liegen beim B-AGV etwa

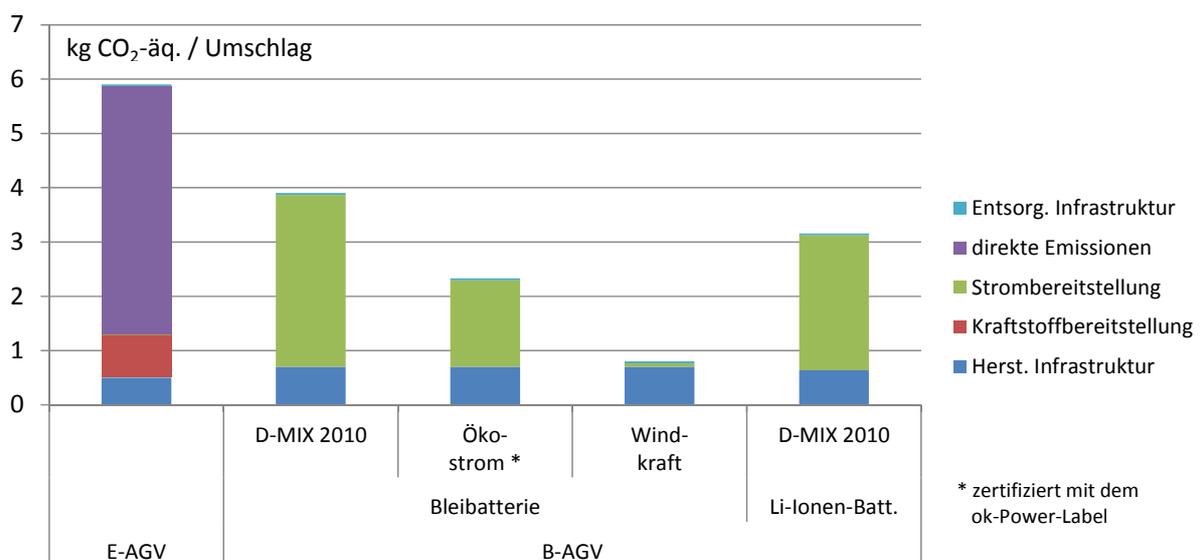
doppelt so hoch wie beim E-AGV und werden daher in Abschnitt 3.7.4.1 detaillierter betrachtet.

Die THG-Bilanz des AGV-Systems wird in allen betrachteten Szenarien durch den Einsatz von batterie-elektrischen AGVs verbessert. Wird für die Erzeugung des Fahrstroms der heute durchschnittliche Kraftwerksmix in Deutschland angesetzt (etwa 633 g CO<sub>2</sub>-äq. / kWh), so kommt man auf eine CO<sub>2</sub>-Einsparung von etwa 33 % über den gesamten Lebensweg. In einem Jahr, spart ein B-AGV gegenüber einem E-AGV damit etwa so viel Klimagase ein, wie ein aktueller Mittelklassewagen über seine gesamte Lebensdauer emittiert.

Zusätzlich können die THG-Emissionen durch den Einsatz von erneuerbarer Energie zum Betrieb der B-AGV deutlich gesenkt werden. Bei CTA wird für den gesamten Terminalbetrieb Ökostrom verwendet, der mit dem „ok-Power“-Siegel zertifiziert ist. Das bedeutet, dass dessen Nutzung den Zubau von erneuerbaren Energien begünstigt und der Strom daher mit geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen bilanziert wird (Details der Strombilanzierung werden in Abschnitt 3.7.4.2 erläutert). Die ausschließliche Nutzung von Strom aus zusätzlichen Windkraftanlagen vermeidet die nutzungsbedingten THG-Emissionen dann beinahe vollständig, so dass die Klimawirkung über den Lebensweg fast nur noch durch die Herstellung der Infrastruktur bedingt ist.

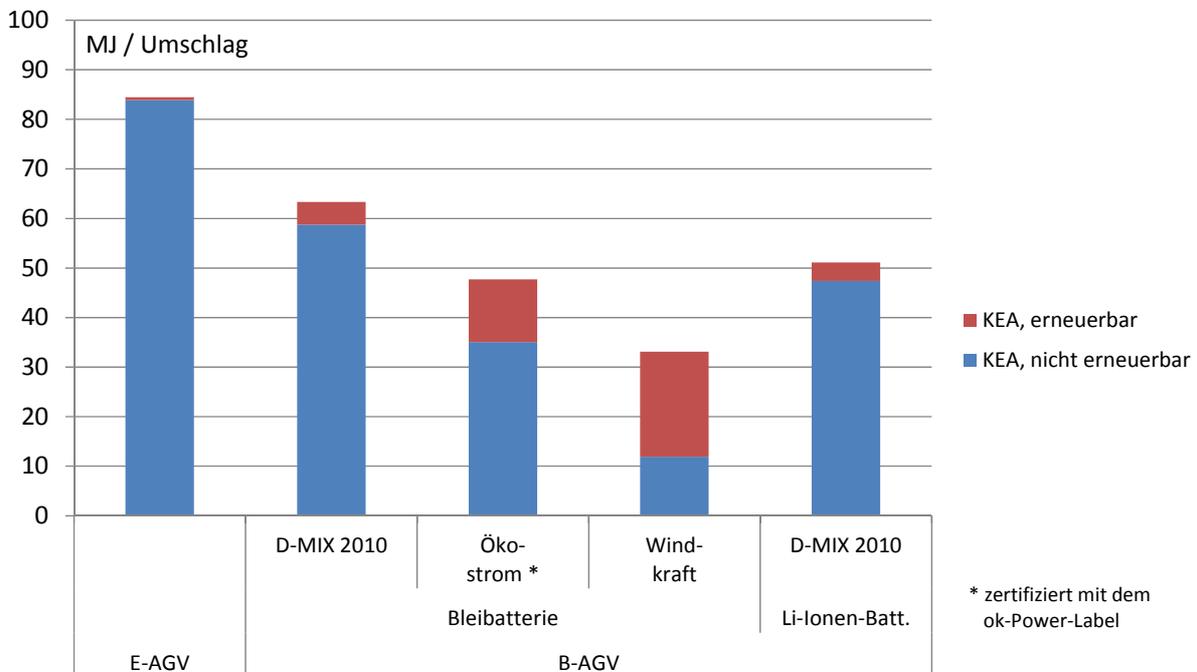
Die Unterschiede bei den nutzungsbedingten Emissionen sind auf mehrere Faktoren zurückzuführen: Zum einen steigert der Wechsel von E-AGV auf B-AGV die Energieeffizienz der Fahrzeuge deutlich: Während der Gesamtwirkungsgrad beim E-AGV etwa 26 % beträgt, liegt er für das B-AGV mit etwa 52 % doppelt so hoch. Der Wirkungsgrad der Strombereitstellung ist zwar auch bei Strom aus fossilen Kraftwerken begrenzt (moderne Kohlekraftwerke erreichen etwa 48 %), liegt aber immer noch deutlich über den eingesetzten Dieselmotoren (~35 %). Beim Dieselkraftstoff sind zudem Emissionen aus Förderung und Raffinierung des Kraftstoffs zu berücksichtigen. Ausschlaggebend ist schließlich die Energieeinsparung durch die vermiedenen Leerlaufverluste, die beim B-AGV deutlich geringer ausfallen (siehe Abschnitt 3.7.4.3).

Würde man beim B-AGV die Bleibatterie durch eine Lithium-Ionen-Batterie nach aktuellem Stand der Technik ersetzen, so ließen sich weitere 25 % der betriebsbedingten Emissionen einsparen. Dies geht vor allem auf den besseren Ladewirkungsgrad der Li-Ionen-Batterie und deren geringeres Gewicht zurück, wodurch thermische Verluste und Rollwiderstand reduziert und der gesamte Energiebedarf deutlich gemindert werden kann (siehe Abschnitt 3.7.5.4).



**Abbildung 69:** Ausstoß von Treibhausgasen über den gesamten Lebensweg

Die geringen THG-Emissionen beim B-AGV-Betrieb mit erneuerbaren Energien dürfen nicht darüber hinwegtäuschen, dass auch hier große Energiemengen verbraucht werden, die damit an anderer Stelle nicht zur Verfügung stehen. Dies verdeutlicht ein Blick auf den kumulierten Energieaufwand der verschiedenen Systeme in **Abbildung 70**. Energieeffizienz bleibt also auch bei Nutzung erneuerbarer Energie ein wichtiges Thema, da Energie auf absehbare Zeit ein kostbares Gut bleiben wird und nicht leichtfertig verschwendet werden darf.



**Abbildung 70:** Kumulierter Energieaufwand über den gesamten Lebensweg

### 3.7.3.2 Versauerung

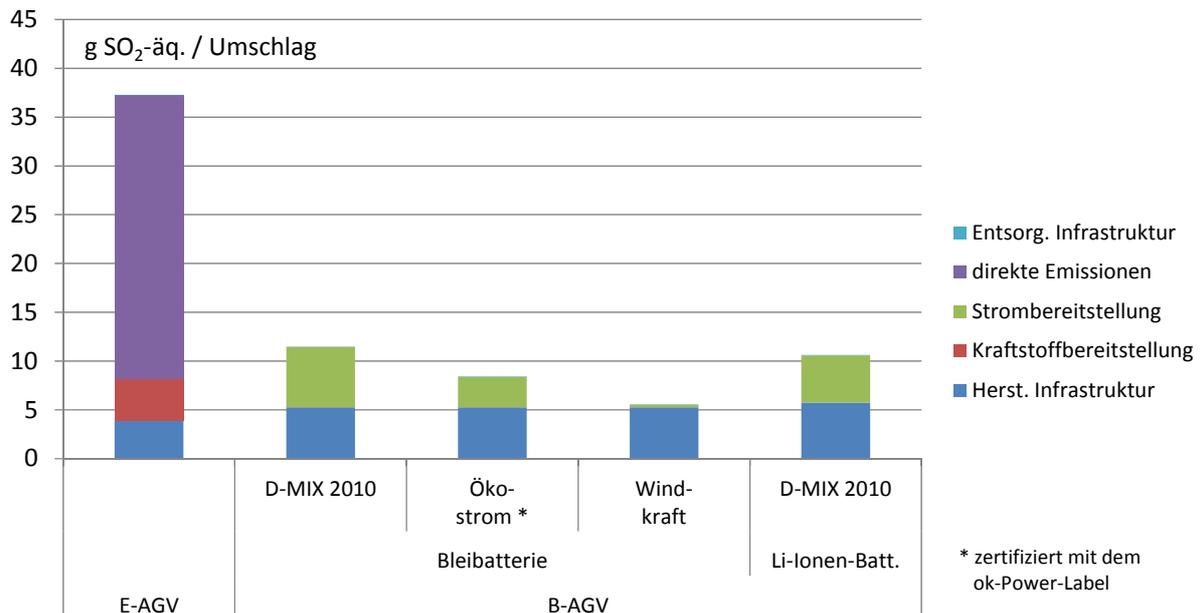
Bereits bei der Klimawirkung zeigen sich in allen Szenarien Vorteile für elektrifizierte AGV, die jedoch stark vom in der Nutzungsphase verwendeten Strommix abhängen. Bei der Versauerungswirkung sind die Vorteile des B-AGV gegenüber dem dieselbetriebenen Referenzfahrzeug noch deutlicher und liegen für alle Szenarien etwa in derselben Größenordnung (Minderung um 70-85 %).

Beim E-AGV wird die Versauerungswirkung stark durch die  $\text{NO}_x$ -Emissionen der Nutzungsphase bestimmt. Schwefelemissionen ( $\text{SO}_2$ ) spielen unter heutigen Bedingungen nur eine geringe Rolle, da der Schwefelgehalt im Dieselmotorkraftstoff – auch durch gesetzliche Vorgaben - in den letzten Jahren deutlich gesunken ist.

Bei modernen Dieselmotoren läuft die Kraftstoffverbrennung bei vergleichsweise hohen Temperaturen ab, um den Wirkungsgrad des Motors zu steigern und damit Kraftstoffverbrauch und  $\text{CO}_2$ -Emissionen zu reduzieren. Die hohe Verbrennungstemperatur führt aber auch zu verstärkter Oxidation des Luftstickstoffs und somit zur Bildung von  $\text{NO}_x$ . Selbst unter Berücksichtigung der bereits verschärften Emissionsgrenzwerte der Stufe III B (ab 2011) entstehen so noch deutlich höhere Emissionen als bei der Strombereitstellung, wo die thermischen Großkraftwerke in Deutschland mittlerweile fast alle mit einer effektiven Rauchgaswäsche ausgestattet sind. Beim B-AGV liegen dagegen die Herstellungsaufwendungen deutlich über dem E-AGV, vor allem aufgrund der großen Traktionsbatterie mit verhältnismäßig geringer Lebensdauer. Deren Gesamteffekt ist jedoch im Vergleich zu den Auspuffemissionen des E-AGV gering.

Über den ökologischen Versauerungseffekt hinaus wirken Stickoxide auch direkt auf die menschliche Gesundheit. Daher wird die Konzentration von  $\text{NO}_2$  seit 2010 durch die EU-Richtlinie 1999/30/EG ([EU 1999]) begrenzt. An vielen straßennahen Messstellen in

Deutschland wird dieser Grenzwert derzeit jedoch überschritten. Die Elektrifizierung der AGV kann damit also einen Beitrag zur Verbesserung der lokalen und städtischen Luftqualität leisten.



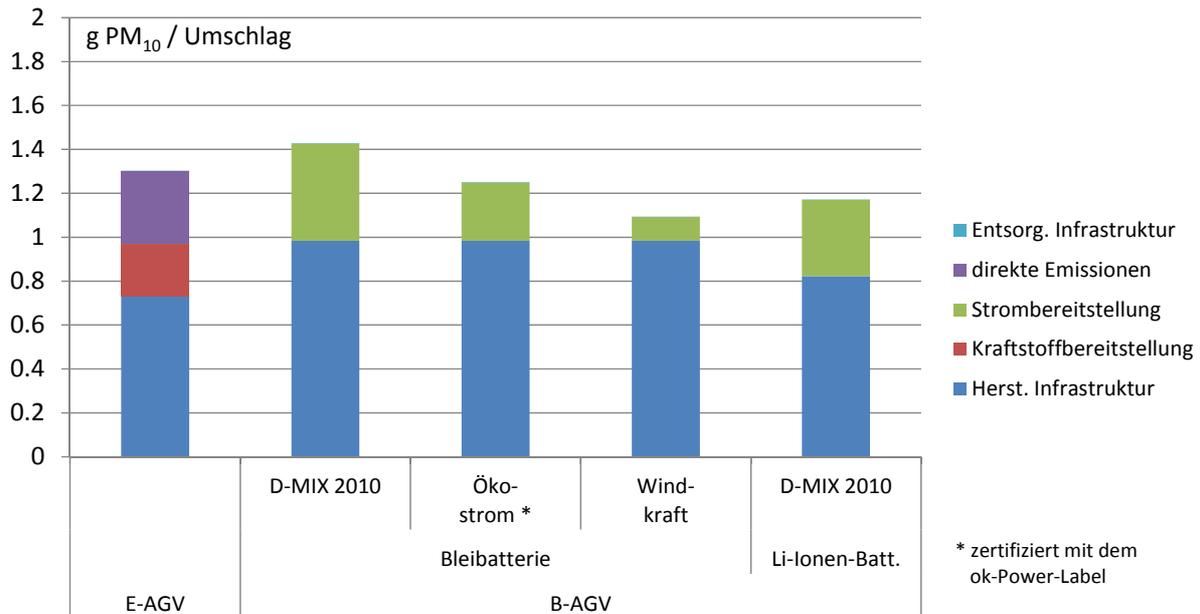
**Abbildung 71:** Versauerungspotential über den gesamten Lebensweg

### 3.7.3.3 Feinstaub und Lärm

Umfangreiche Untersuchungen zeigen die negative Wirkung der Luftbelastung mit Feinstaub (PM<sub>10</sub>) auf die Gesundheit des Menschen. Zum Schutz der Gesundheit hat die EU deshalb Grenzwerte erlassen, die in der 22. BImSchV in deutsches Recht umgesetzt wurden. Diese seit 2005 gültigen Grenzwerte für PM<sub>10</sub> werden heute jedoch trotz einer deutlichen Verringerung der Partikelemissionen sowie deren Vorläufersubstanzen in den letzten Jahrzehnten an vielen Orten in Deutschland überschritten.

Die Feinstaubbilanz der AGV in **Abbildung 72** zeigt, dass die Emissionen vor allem auf die Herstellung der Fahrzeuge (und insbesondere der Batterie bei B-AGV) zurückgehen und für B-AGV und E-AGV ähnlich hoch sind. Die zusätzlichen Emissionen der B-AGV-Herstellung sind durch die Batterieherstellung bedingt. Bei Fahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterie sind sie daher gegenüber AGV mit Bleibatterie etwas niedriger, da aufgrund der höheren Zyklenfestigkeit weniger Batterien über das Fahrzeugleben benötigt werden (siehe Abschnitt 3.7.4.1).

Die nutzungsbedingten Feinstaubemissionen des E-AGV liegen sogar noch etwas unter den Herstellungsemissionen und sind etwa mit den Emissionen der Strombereitstellung für B-AGV bei durchschnittlichem deutschem Strommix vergleichbar. Es findet jedoch eine Verlagerung der Emissionen statt: So kann es aus gesundheitlicher Sicht bereits vorteilhaft sein, wenn die direkten (Auspuff-)Emissionen des E-AGV durch die Elektrifizierung an den Standort der stromerzeugenden thermischen Kraftwerke verlagert werden. Zudem besteht hier zukünftig deutliches Verbesserungspotenzial zur Senkung der strombedingten Feinstaubemissionen durch Ersetzung von Altanlagen, sowie durch den Ausbau erneuerbarer Energien. Die Verbesserungsmöglichkeiten des dieselgetriebenen Referenzfahrzeugs sind hingegen begrenzt, da bereits ein fortgeschrittener Stand der Technik unterstellt wurde. Zudem können die direkte Stickoxid und Schwefeldioxidemissionen der E-AGV zur Bildung sekundärer Aerosole führen, die die Belastung weiter erhöhen.



**Abbildung 72:** Feinstaubemissionen über den gesamten Lebensweg

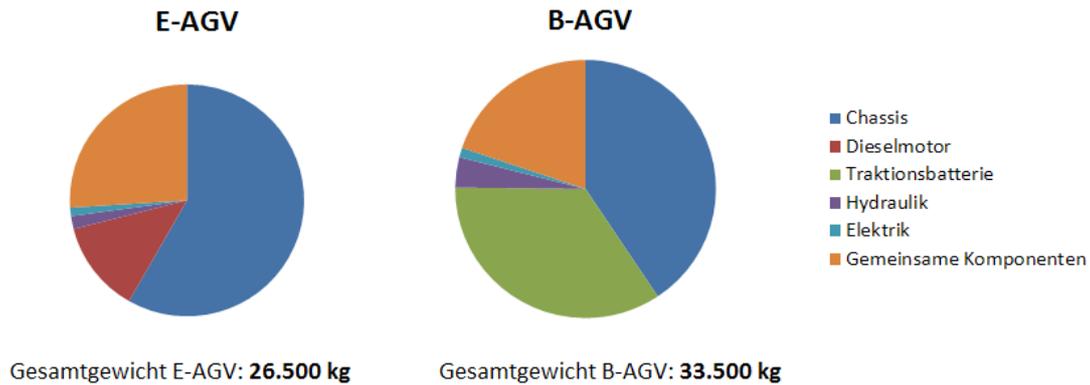
Neben Klimagas- und Schadstoffemissionen ist der Betrieb von E-AGV auch mit akustischen Emissionen verbunden. Studien (z.B. [WHO 2011]) belegen negative Effekte des Lärms von Schlaflosigkeit bis zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Die Auswirkungen hängen dabei sowohl von objektiven Kriterien wie Lautstärke und Häufigkeit, als auch von subjektiven Kriterien wie der Lärmempfindlichkeit und der persönlichen Einstellung gegenüber der Lärmquelle ab.

Im Hafen werden die Fahrzeuge rund um die Uhr in der Nähe bewohnter Gebiete eingesetzt. Bei E-AGV entstehen die meisten Geräusche durch das permanent laufende Dieselaggregat, das neben dem Antrieb auch den Energiebedarf sämtlicher weiterer Funktionen des AGV deckt. Durch die Umstellung auf Batteriebetrieb fällt diese Geräuschquelle weg; nur das Summen der Frequenzumrichter sowie das Betriebsgeräusch der Hydraulikpumpe bleiben. Da nur geringe Geschwindigkeiten (bei CTA bis max. 4,0 m/s) gefahren werden, sind die Abrollgeräusche der Reifen gering. Insgesamt wird die Lärmbelastung durch B-AGV gegenüber E-AGV erheblich reduziert.

### 3.7.4 Erläuterungen zu den einzelnen Teilsystemen

#### 3.7.4.1 Bereitstellung der Infrastruktur

Die bilanzierte Infrastruktur besteht aus den Fahrzeugen, der Betankungs- bzw. Batteriewechselstation (BWS), sowie den Traktionsbatterien für B-AGVs. Betankungsstation und BWS werden hier nur überschlägig über den Materialeinsatz (vor allem Stahl und Beton) bilanziert. Bei den Fahrzeugen und Batterien wird eine differenziertere Betrachtung durchgeführt.



**Abbildung 73:** Gewichtsverteilung bei den verschiedenen AGV-Typen

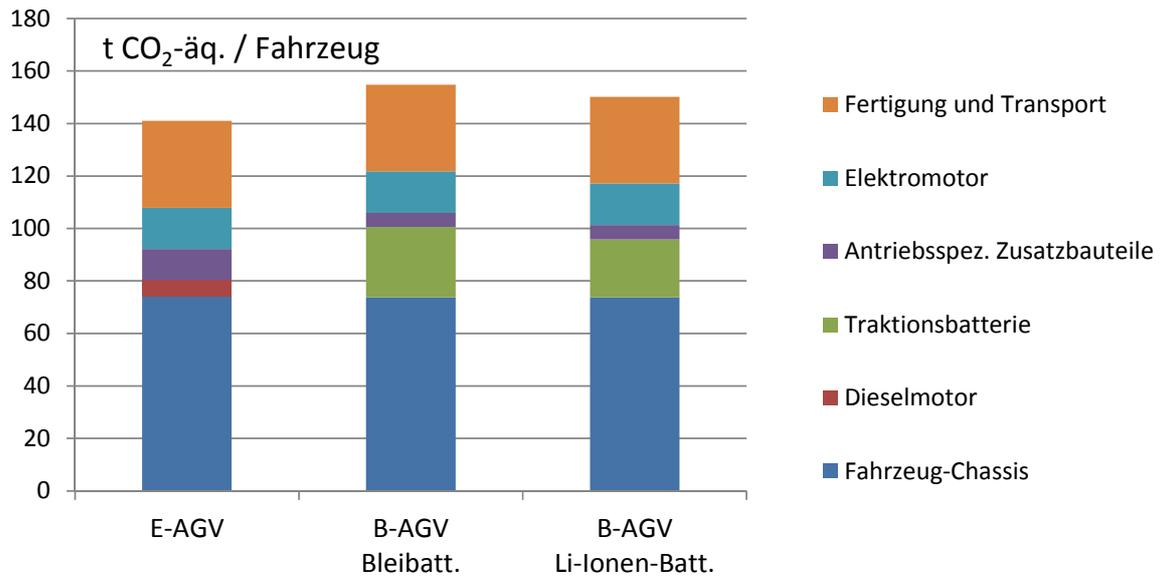
**Abbildung 73** stellt die Anteile der einzelnen Baugruppen am Fahrzeuggewicht für beide AGV-Typen dar. Das Chassis und weitere Komponenten wie der Elektromotor sind bei beiden Fahrzeugen weitgehend identisch. Das E-AGV besitzt darüber hinaus einen 250 kW Dieselmotor mit angeschlossenem Generator. Beim B-AGV erhöht sich das Fahrzeuggewicht insbesondere durch die Traktionsbatterie (neun 80 V-Bleibatterien in Serie mit einer nutzbaren Gesamtkapazität von 250 kWh). Weitere geringe Unterschiede bestehen im Hydrauliksystem (das v.a. die Lenkung der AGV antreibt), da die Hydraulikpumpe beim E-AGV direkt vom Dieselmotor angetrieben wurde, während dafür beim B-AGV ein eigener Elektromotor installiert werden musste.

Mit Ausnahme der Traktionsbatterie bestehen die AGV zum großen Teil aus Stahl, auf dessen Herstellung und Verarbeitung folglich die meisten herstellungsbedingten Umweltwirkungen entfallen. Da der Stahlbau sich zwischen den AGV-Typen nicht wesentlich unterscheidet, wurde auf eine detaillierte Bilanzierung der AGV-Fertigungslinie verzichtet und stattdessen ein durchschnittlicher Metallbearbeitungsprozess angenommen.

Ebenfalls wurde der Einsatz von Rohmaterialien aus Recyclingprozessen nicht detailliert betrachtet, sondern stattdessen ein Cutoff-Ansatz angewandt: Das bedeutet, dass Sekundärmaterialien (z.B. Stahlschrott) dem System ohne Umweltlasten zugeführt werden, verwertbare Materialien das System auf der anderen Seite ohne Gutschriften verlassen.

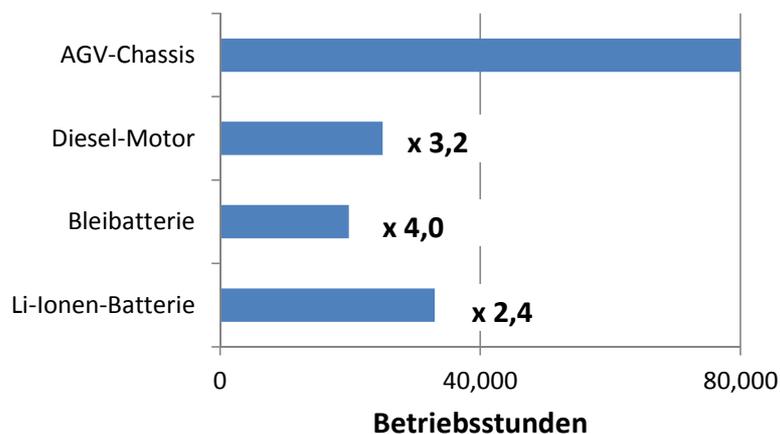
Für die Bilanzierung der Bleibatterie wurde auf Literaturdaten zurückgegriffen, die vom Batteriehersteller Hawker bestätigt wurden [Rydh 1999, Geile 2011]. Während die Technologie der Bleibatterie weitgehend ausgereift und etabliert ist, stehen Lithium-Ionen-Batterien für den Automotive-Bereich noch am Anfang ihrer kommerziellen Entwicklung. Diesem Bericht liegen Industriedaten für den Produktionsprozess von Lithium-Ionen-Batterien aus dem Jahr 2010 zugrunde; dabei wurden verschiedene Zelltechnologien betrachtet.

In **Abbildung 74** ist dargestellt, wie sich die Klimawirkung durch die Fahrzeugherstellung auf die einzelnen Komponenten verteilt. Der Unterschied zwischen der Herstellung des Dieselmotors und der Batterie ist zwar sichtbar, aber in der Summe sind die THG-Emissionen pro Fahrzeug beim B-AGV nur geringfügig höher. Zusätzlich sind jedoch auch die Lebensdauern der Komponenten (siehe **Abbildung 75**) zu berücksichtigen, die zu deutlichen Unterschieden in den Herstellungsbilanzen führen, wenn sie auf einen Container-Umschlag abgeschrieben werden (siehe **Abbildung 76**).

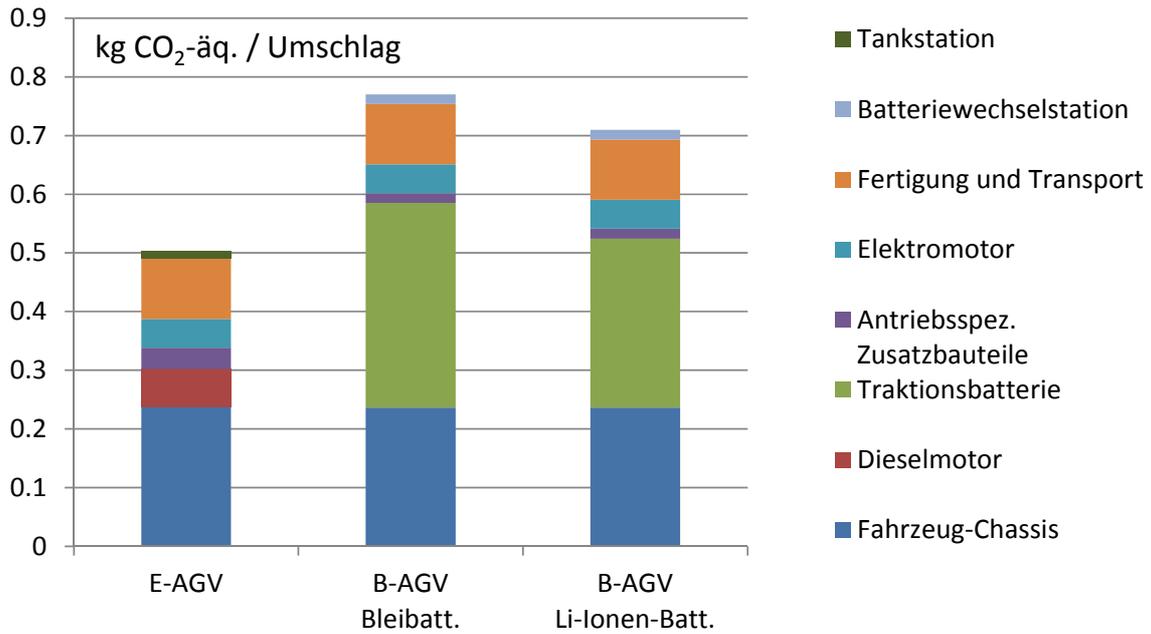


**Abbildung 74:** Treibhausgasemissionen bei der Herstellung eines AGV

Ein AGV-Chassis hat eine angenommene Lebensdauer von 15 Jahren bzw. 80.000 Betriebsstunden. Der Diesel-Motor des E-AGV muss ca. 3 mal in dieser Zeit ersetzt werden, allerdings sind seine herstellungsbedingten Umweltwirkungen relativ gering. Entscheidend ist die begrenzte Zyklenfestigkeit der Bleibatterie, die dazu führt, dass pro Fahrzeug im Schnitt etwa einmal in vier Jahren eine Batterie ersetzt werden muss. Dies führt zu einem überproportionalen Anstieg des Batteriebeitrags zur Treibhausgasbilanz über den Lebensweg, wie in Abbildung 76 zu sehen ist. Wie sich eine Variation der Zyklenanzahl der Batterie auf die Gesamtbilanz auswirkt, wird im Abschnitt 3.7.5.4 diskutiert.



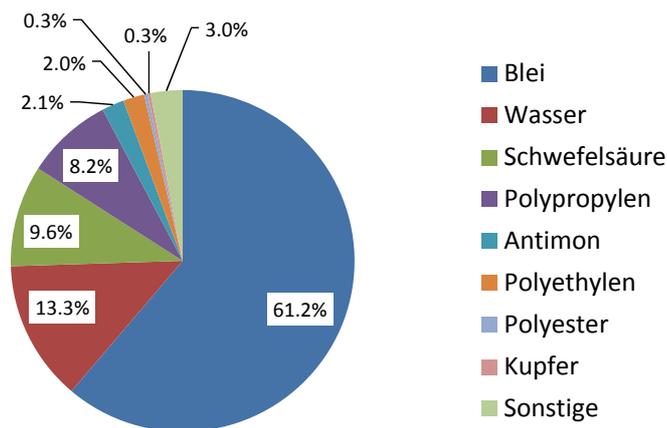
**Abbildung 75:** Lebensdauern der AGV-Komponenten



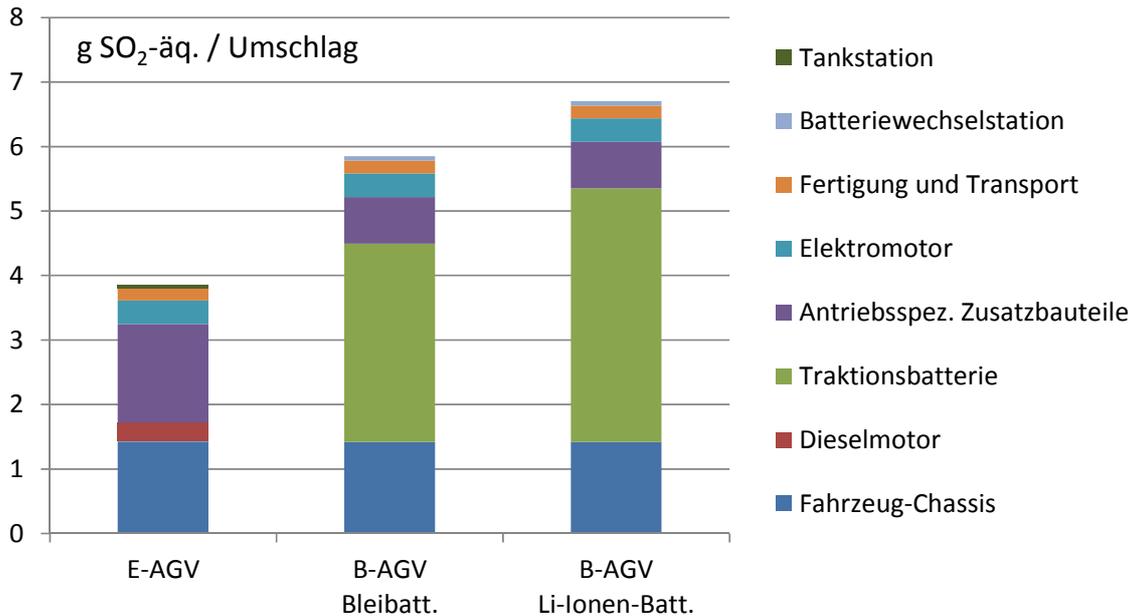
**Abbildung 76:** Treibhausbilanz der Infrastruktur-Herstellung, bezogen auf einen Umschlag

Die Klimawirkung der Batterieherstellung wird vor allem durch den Fertigungsprozess bestimmt, gefolgt von der Gewinnung des enthaltenen Bleis sowie des Antimons, das trotz seines geringen Massenanteils eine relevante Rolle in der Ökobilanz der Batterie spielt. Die Zugabe von Antimon soll die Zersetzung der Batterieelektroden verlangsamen und so die Zyklenfestigkeit der Bleibatterie erhöhen [Ruetschi 2004].

Die mit dem Herstellungsprozess verbundene Versauerung (**Abbildung 78**) wird aufgrund der geringen Batterielebensdauer ebenfalls überproportional durch die Batterie bedingt. Da für Blei bereits ein gut funktionierender Recyclingmarkt existiert, wurde nach [Ecoinvent 2008] die Verwendung von 75 % Sekundärblei unterstellt. Ohne ein solches Recycling würden die mit der Herstellung von Bleibatterien verbundenen Umweltwirkungen, insbesondere die Versauerung, deutlich höher liegen.



**Abbildung 77:** Materialzusammensetzung der Bleibatterie



**Abbildung 78:** Versauerung durch Infrastruktur-Herstellung, bezogen auf einen Umschlag

### 3.7.4.2 Energiebereitstellung

#### Dieselmotorkraftstoff

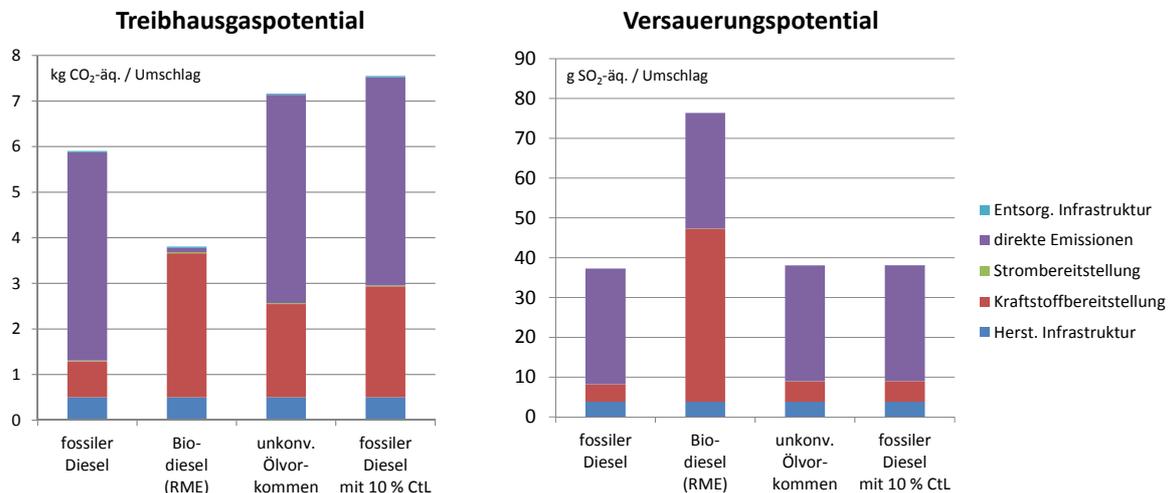
E-AGV werden mit einem Standard-Dieselmotorkraftstoff aus deutscher Raffinerieproduktion ohne Beimischung von Biokraftstoffen betankt. Die Modellierung der Refinerie erfolgt in UMBERTO über ein am IFEU entwickeltes Refinerie-Modell, das bereits in zahlreichen IFEU-Projekten eingesetzt wurde. Darin ist auch die Bereitstellung des Energieträgers berücksichtigt. Die wesentlichen Basisdaten gehen zurück auf [Hedden & Jess 1994] und [FZ Jülich 1994], den Mineralölwirtschaftsverband ([MWV 2001]) und zahlreiche von ifeu direkt recherchierte Unternehmensdaten. Der Anteil der Kraftstoffbereitstellung an der Treibhausgasbilanz ist heute mit etwa 15 % der gesamten nutzungsbedingten Emissionen relevant (siehe **Abbildung 79**).

Prinzipiell können E-AGV (einige Umbaumaßnahmen am Dieselmotor vorausgesetzt) auch mit reinem Biodiesel betrieben werden. In diesem Fall werden die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Fahrzeugbetriebs bilanziell nicht berücksichtigt, da die entsprechende Menge CO<sub>2</sub> beim Wachstum der verwendeten Energiepflanzen gebunden wurde. Nichtsdestotrotz entstehen bei Ernte und Verarbeitung der Biomasse erhebliche CO<sub>2</sub>-Emissionen, so dass die Gesamtbilanz bei Biodiesel aus Raps gegenüber konventionellem Diesel lediglich einen Rückgang von etwa 35 % bei den Treibhausgasemissionen ausweist.

Die Herstellung des Biokraftstoffs trägt außerdem nicht unerheblich zur Versauerung bei, was vor allem auf die Emissionen bei Herstellung und Einsatz von Düngemitteln zurückzuführen ist. Überdies müssen weitere negative Umweltwirkungen durch den Düngemiteleinsatz berücksichtigt werden, insbesondere die Eutrophierung (Überdüngung) von Böden und Gewässern, die das Gleichgewicht des umgebenden Ökosystems gefährden kann. Schließlich kann der Anbau von Energiepflanzen auch zu direkten und indirekten Landnutzungsänderungen mit negativen Auswirkungen auf die Klimabilanz führen. Die genauen Auswirkungen sind aufgrund ihrer Komplexität jedoch ökobilanziell schwierig zu quantifizieren.

Perspektivisch können auch unkonventionelle Ölvorkommen zur Rohölversorgung beitragen, z.B. Ölsande und Ölschiefer. Aus diesen muss das Rohöl zunächst in einem energieintensiven Prozess extrahiert werden, was die Treibhausgasbilanz der Kraftstoffvorkette deutlich verschlechtert (siehe **Abbildung 79**). Zusätzlich ist der Einsatz von so genannten ‚Coal-to-Liquid‘-Kraftstoffen (CtL) denkbar, da die globalen Kohlereserven

nach gängiger Einschätzung erst deutlich später als die Rohölreserven erschöpft sein werden ([IEA 2010]). Die Herstellung von CtL setzt jedoch etwa 20 mal so viel Klimagase frei wie die Herstellung gewöhnlichen Raffineriediesels ([Schimpf 2010]), weshalb bereits ein Anteil von 10 % CtL am Dieserverbrauch die Klimawirkung des E-AGV-Betriebs verdoppeln würde. Aufgrund von Akzeptanzproblemen ist es jedoch fraglich ob diese Kraftstoffe tatsächlich auf den deutschen Markt gelangen. Die Nachhaltigkeit wird auch auf EU-Ebene bereits kritisch diskutiert ([McLennan 2011]).



**Abbildung 79:** Bilanzierter Vergleich verschiedener Pfade der Kraftstoffbereitstellung zum Betrieb von E-AGVs

### Stromerzeugung

Die Umweltwirkungen der Stromerzeugung sind stark vom Strommix und Technologieeinsatz abhängig. Daher werden die verschiedenen Kraftwerkstypen mit dem IFEU-Strommaster separat bilanziert. Es handelt sich dabei um ein hoch differenziertes Ökobilanzmodell zur Berechnung von Strombereitstellungsketten, das bereits in zahlreichen IFEU-Ökobilanzen verwendet wurde. Darin sind die grundsätzlichen Energieträger- und Kraftwerksarten als einzelne Module hinterlegt.

Im B-AGV-Feldversuch wird das Ökostromprodukt „Hamburg Newpower“ der Firma Vattenfall verwendet, das bereits in den Gesamtbilanzen (Abbildungen 69, 70 und 71) aufgeführt wurde. Es ist mit dem „ok-Power-Label“ nach Händlermodell zertifiziert, das heißt, es muss

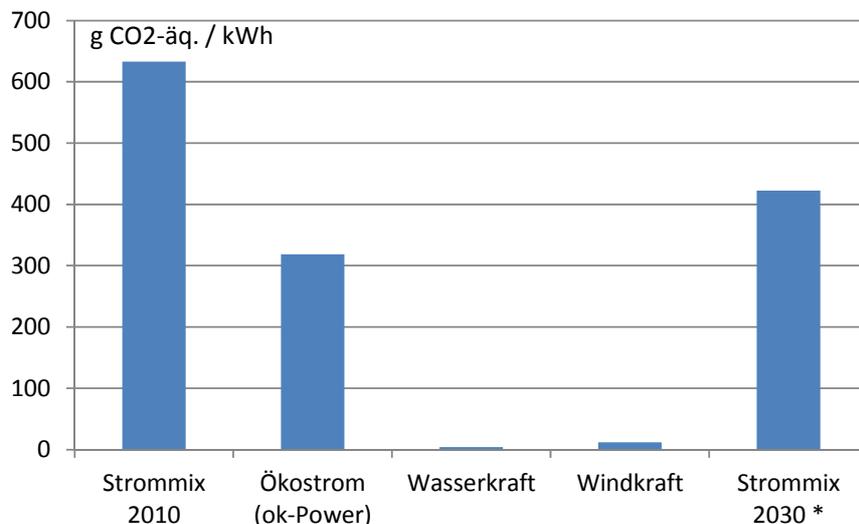
- ein Drittel des regenerativen Stroms aus Neuanlagen oder neueren Bestandsanlagen stammen, die nicht älter als 6 Jahre sind, und
- ein weiteres Drittel aus älteren Bestandsanlagen mit einem Höchstalter von 12 Jahren.
- Für das verbleibende Drittel („Altanlagen“) gibt es keine Vorgabe für das Alter der Kraftwerke.

Der ökobilanzielle Umgang mit international gehandelten (Öko-)Stromzertifikaten ist umstritten. Mehrere Regelwerke lassen die Anrechnung solcher Stromeinkäufe auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz nicht zu, so auch die ISO 14040, die eine physische Kopplung zwischen den betrachteten Stoff- und Energieflüssen voraussetzt. Zu solchen prinzipiellen Erwägungen kommen Detailprobleme bei dem Versuch einer Anrechnung, da in jedem Fall eine doppelte Anrechnung des Ökostroms verhindert werden muss. Oft weist beispielsweise die nationale Statistik des Erzeugerlandes den Ökostrom trotz seines internationalen Verkaufs weiterhin aus. Auf dieses Problem haben auch IFEU und Öko-Institut in dem BMU „Memorandum Product Carbon Footprint“ ([BMU 2009]) hingewiesen, schlagen aber vor, darüber wegen der geringen Signifikanz in Ökobilanzen bis Ende 2011 hinwegzusehen.

Ein anderes Problem ergibt sich daraus, dass die Verbrauchernachfrage nach Ökostrom zurzeit deutlich unterhalb dessen liegt, was gegenwärtig aus erneuerbaren Energien produziert wird. Daher ist das entscheidende Kriterium für den ökologischen Nutzen von Ökostrombezug, ob dieser zum Ausbau erneuerbarer Energien beiträgt und nicht eine reine Umverteilung des Stromverbrauchs bewirkt. Bei alten Wasserkraftanlagen, die bereits abgeschrieben sind und vormalig zum allgemeinen Erzeugungsmix des betreffenden Landes beitrugen, ist dies fraglich. Bei der genauen Einordnung von Erzeugungsanlagen in „alt“ und „neu“ handelt es sich jedoch um eine Ermessensfrage; die Memorandum Definition ([BMU 2009]) deckt sich hier mit dem Schema, das im Zertifizierungsprozess des ok-Power-Labels angewandt wird.

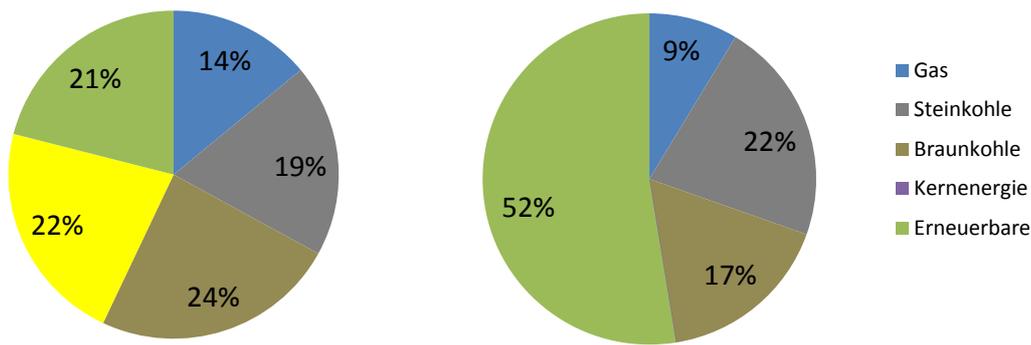
Zur Bewertung der Klimawirkung eines speziellen Ökostromproduktes, muss das Anlagenalter bei der Berechnung des CO<sub>2</sub>-Faktors berücksichtigt werden. Im Memorandum ([BMU 2009]) wird vorgeschlagen, Strom aus Neuanlagen und neueren Bestandsanlagen zu 100 % als erneuerbare Energie anzurechnen, wohingegen Strom aus älteren Bestandsanlagen mit 50 % EE und 50 % Durchschnittsmix des nationalen Netzes angerechnet werden soll. Strom aus Altanlagen wird danach wie der Durchschnittsmix des nationalen Netzes bilanziert.

Damit liegt der im Projekt verwendete Ökostrom in der Klimawirkung etwa zwischen dem durchschnittlichen deutschen Strommix und Strom aus zusätzlichen Wind- oder Wasserkraftanlagen (**Abbildung 80**). Zusätzlich sind die THG-Emissionen des durchschnittlichen Strommixes aufgetragen, der in der Leitstudie 2010 für das BMU bei den Betrachtungen für das Jahr 2030 zugrunde gelegt wird [DLR 2010]. Eine Aufschlüsselung des prognostizierten Strommixes und ein Vergleich mit der aktuellen Situation ist in **Abbildung 81** dargestellt.



\* nach [DLR 2010]

**Abbildung 80:** Treibhausgasemissionen bei der Stromerzeugung



**Abbildung 81:** Anteile der einzelnen Kraftwerkstypen an der Stromerzeugung (aktuell bzw. nach Szenario 2030)

Der Vergleich zeigt: Trotz der nur teilweisen Anrechnung werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen des B-AGV-Betriebs durch die Verwendung von Ökostrom im CTA etwa halbiert. Die Emissionen sind damit schon heute deutlich geringer, als sie bei Verwendung von Durchschnittsstrom im Jahr 2030 sein würden, und dies trotz des unterstellten starken Ausbaus erneuerbarer Energien in Deutschland.

### 3.7.4.3 Fahrzeugbetrieb

Im Feldversuch wurden die beiden B-AGV-Prototypen unter realen Einsatzbedingungen im Terminal getestet. Es wurden dabei keine signifikanten Unterschiede im Einsatzverhalten der beiden AGV-Typen beobachtet. Insbesondere die zum Batteriewechsel benötigte Zeit von ca. 5 min für eine Einsatzzeit von mindestens 12 Stunden wirkt sich nur minimal auf die Produktivität der Fahrzeuge aus. Es wird daher für beide Fahrzeugtypen die gleiche Anzahl von Umschlägen pro Betriebsstunde angenommen. Somit ist es ausreichend, für den ökobilanziellen Vergleich der Nutzungsphase die Verbräuche pro Betriebsstunde (anstatt pro Containerumschlag) zugrunde zu legen (siehe **Tabelle 16**).

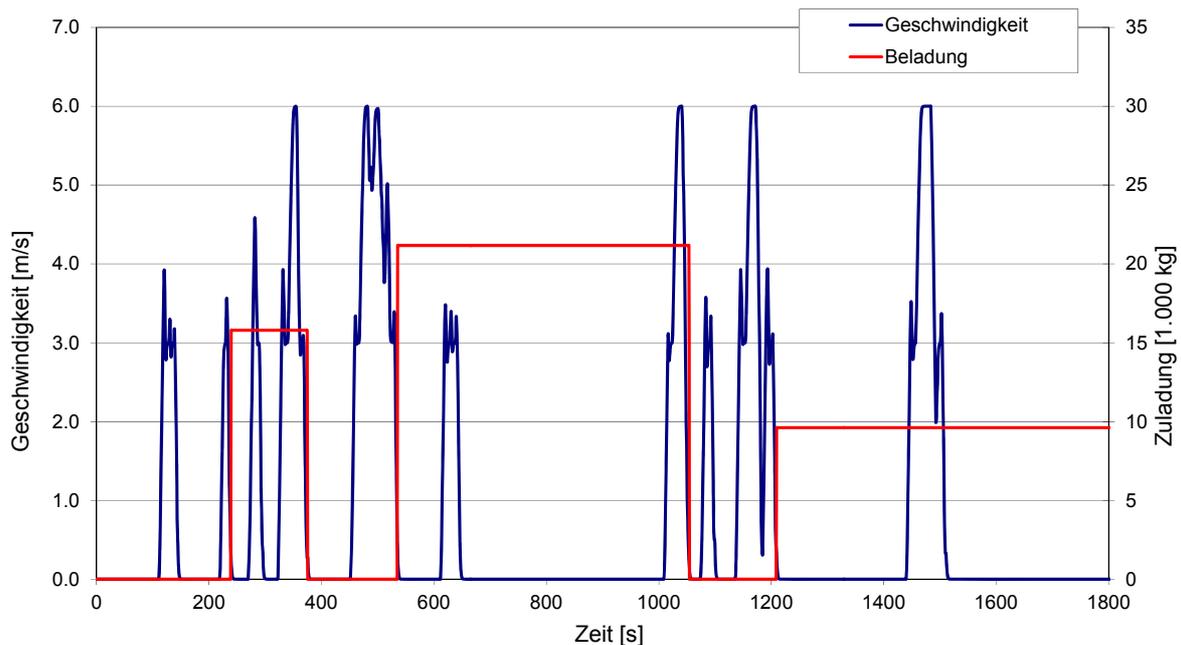
**Tabelle 16:** Betriebsparameter der AGV (Realdaten aus Feldtest)

Verbrauch E-AGV [Liter Diesel pro Betr.std.]	7,2
Verbrauch B-AGV [kWh pro Betr.std.]	14,2
Umschläge pro Betr. std.	3,9
	IFEU 2011

Um eine einheitliche Grundlage für die Analyse des AGV-Betriebs zu schaffen, wurde vom Projektpartner ika ein künstlicher Referenz-Fahrzyklus entwickelt, der auf einer logistischen Simulation des Hafenbetriebs basiert. **Abbildung 82** gibt einen Überblick über den Verlauf von Geschwindigkeit und Beladung während eines 30-minütigen Intervalls innerhalb dieses Referenzzyklus. Das Fahrprofil der AGV ist demnach wesentlich durch Wartezeiten geprägt (auf den Be- und Entladevorgang, auf die Vorbeifahrt anderer AGVs, auf das Freiwerden von Beladungsplätzen, etc.), was zu einem relativ geringen Fahranteil von durchschnittlich etwa 40 % führt. Es ist zu beachten, dass im Referenzzyklus mit bis zu 6 m/s gefahren wird, während die Maximalgeschwindigkeit bei CTA 4 m/s beträgt. Für die kumulierten Umschlagszahlen und Verbräuche wurden daher stets die Realdaten aus dem Feldversuch verwendet.

**Tabelle 17:** Kenndaten des Referenzzyklus

Dauer des Zyklus	3167 s
Fahrstrecke	3536 m
Fahranteil	38 %
durchschnittl. Geschw. (gesamt)	1,12 m / s
durchschnittl. Geschw. (nur Fahranteil)	2,93 m / s
IFEU 2011	

**Abbildung 82:** Geschwindigkeit und Nutzlast im Referenzzyklus

Wesentlicher Bestandteil der Bilanzierung des AGV-Betriebs ist die Ermittlung der CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionen der dieselgetriebenen AGV. Seit 1999 gibt es für die Schadstoffemissionen von Non-road-Fahrzeugen, zu denen auch AGV gehören, EU-weite Grenzwerte für Neufahrzeuge. Diese wurden seither kontinuierlich verschärft; seit 2011 gilt für Aggregate mit einer Ausgangsleistung von mehr als 130 kW ein NO<sub>x</sub>-Grenzwert von 2 g / kWh im Prüfzyklus (Non-road Transient Cycle, NRTC). Um diesen einzuhalten, ist das Referenz-AGV bereits mit einem SCR-Katalysator ausgestattet, der durch Zugabe von Ammoniak in den Abgasstrom einen großen Teil des entstandenen NO<sub>x</sub> zu Stickstoff reduziert.

Ein Anhaltspunkt für das Emissionsverhalten des E-AGV sind die oben genannten Grenzwerte. Diese beruhen jedoch auf dem standardisierten Non-Road Transient Cycle (NRTC), der sich grundlegend vom Betriebszyklus der AGV im Hafen unterscheidet. Auch das Emissionsverhalten von Straßenfahrzeugen (z.B. das Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr (HBEFA) [INFRAS 2009]) lässt nur bedingt Rückschlüsse auf das Emissionsverhalten der AGV zu, da sich die Fahrzyklen grundsätzlich unterscheiden.

Die Emissionen der E-AGV wurden daher für den spezifischen Referenzzyklus der AGV modelliert. Dabei wurde das „**Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model**“ (**PHEM**) der TU-Graz eingesetzt, das auch zur Ermittlung der Emissionsfaktoren des HBEFA verwendet wird [TU Graz 2009].

**Tabelle 18:** Emissionsfaktoren für E-AGV im Referenzzyklus

<b>Schadstoff</b>	<i>g / Betr.std.</i>	<b>Schadstoff</b>	<i>g / Betr.std.</i>
Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	162	Partikel (PM <sub>10</sub> )	1,27
Kohlenwasserstoffe (HC)	0,72	Kohlenmonoxid (CO)	69,3

IFEU 2011 nach Hausberger 2011

### 3.7.5 Sensitivitäten

#### 3.7.5.1 Unterschiede im Leerlaufbetrieb

Ein AGV erreicht typischerweise etwa 5500 Betriebsstunden pro Jahr. Der Fahranteil, also der Teil der Zeit, in dem sich das Fahrzeug tatsächlich bewegt, ist allerdings erheblich geringer; er liegt bei durchschnittlich etwa 40 %. Die dazwischen liegenden Standzeiten werden teilweise zum Be- und Entladen verwendet, aber auch Wartezeiten, z.B. auf die Vorbeifahrt anderer Fahrzeuge, sind in einem komplexen logistischen System nicht zu vermeiden. Die Senkung des Leerlaufverbrauchs kann daher einen großen Beitrag zur energetischen Optimierung des Gesamtsystems leisten.

Bei E-AGV werden neben dem Elektromotor auch das Hydrauliksystem und die Bordelektronik durch den Dieselmotor mit Energie versorgt, weshalb dieser auch während der Standzeiten ununterbrochen weiterlaufen muss. Der Dieserverbrauch liegt in diesem Betriebszustand bei ca. 41 % des stündlichen Durchschnittsverbrauchs. Der Leerlaufverbrauch des B-AGV hingegen liegt mit ca. 750 W bei nur knapp 5 % des Durchschnittsverbrauchs. Durch die Umstellung von E-AGV auf B-AGV werden daher nach Nutzung im Hafenprofil mit einem Leerlaufanteil von 60 %, allein in diesem Leerlaufbetrieb bei Nutzung des durchschnittlichen Strommix jährlich fast 30 Tonnen Treibhausgasemissionen und 366 TJ Primärenergie eingespart (siehe **Tabelle 19**). Das entspricht etwa den jährlichen Emissionen von 15 Mittelklasse-Pkw. Damit werden von den gesamten Einsparungen durch die Elektrifizierung im Betrieb allein 72 % während der Leerlaufphasen erreicht. Die Energieeinsparung ist dabei gleichbedeutend mit einer Kosteneinsparung von knapp 10'000 €, wenn man einen Strompreis von 10 ct/ kWh und einen Dieselpreis von 80 ct/ Liter zugrunde legt. Weitere Einsparungen durch eventuelle Steuervorteile oder die Vermeidung des Kaufs von Emissionszertifikaten sind hier nicht berücksichtigt.

**Tabelle 19:** Leerlaufeinsparungen Batterie-AGV gegenüber E-AGV (pro AGV und Jahr)

	Primärenergie	Treibhausgasemissionen	Kosten*
Gesamteinsparung bei 60 % Leerlaufanteil	366 TJ	29,2 t	9090 €
Einsparung pro %-Punkt Leerlauf	6 TJ	490 kg	151 €

\* Annahmen: 80 ct / Liter Diesel, 10 ct / kWh Strom

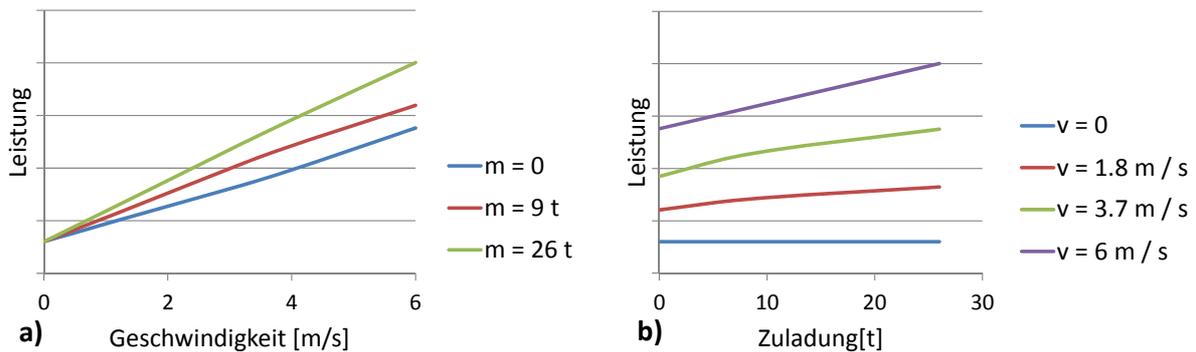
Damit zeigt sich auch die Abhängigkeit der Klimabilanz in der Nutzungsphase vom Leerlaufanteil der AGV. Weicht dieser signifikant vom angenommenen Hafenprofil ab, fallen die Treibhausgasemissionen entsprechend höher oder niedriger aus. Jeder Prozentpunkt Abweichung ist dabei gleichbedeutend mit etwa 0,5 Tonnen Treibhausgasemissionen pro AGV und Jahr.

#### 3.7.5.2 Abhängigkeit des Zyklusverbrauchs von der Maximalgeschwindigkeit

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den vom Projektpartner ika simulierten AGV-Zyklusdaten und der realen Betriebssituation bei CTA ist die Maximalgeschwindigkeit (Simulation 6 m/s, CTA 4 m/s). Diese Deckelung der Geschwindigkeit wurde eingeführt, um den logistischen Betriebsfluss auf dem kompakten CTA-Betriebsgeländer zu verstetigen. Hier wird der Frage nachgegangen, wie sich diese Geschwindigkeitsbegrenzung beim B-AGV auf den Energieverbrauch, bezogen auf die funktionelle Einheit, auswirkt.

Die Fahrwiderstände eines AGV werden vom Rollwiderstand dominiert, die benötigte Motorleistung steigt damit proportional zur Geschwindigkeit (**Abbildung 83a**). Hinzu kommt

ein erheblicher Nebenverbrauch durch die Hydraulikpumpe, der auch bei Geradeausfahrt eine Leistung von einigen kW beträgt.



**Abbildung 83:** Leistung bei Konstantfahrt in Abhängigkeit von Geschwindigkeit  $v$  und Zuladung  $m$

Diese Verbräuche müssen nun auf den Transport eines Containers im Referenzzyklus, also auf die funktionelle Einheit bezogen werden. Zusätzlich zum Referenzzyklus ( $v_{\max} = 6 \text{ m/s}$ ) werden daher zwei weitere Zyklen mit  $v_{\max} = 3,7 \text{ m/s}$  bzw.  $v_{\max} = 1,8 \text{ m/s}$  definiert. Sie werden aus dem Referenzzyklus abgeleitet, indem sämtliche Abschnitte mit  $v > v_{\max}$  durch Konstantfahrten der gleichen Weglänge mit  $v_{\max}$  ersetzt werden. Dadurch verlängern sich die Zyklen und der Fahranteil steigt an, es werden aber auch weniger Container pro AGV und Stunde transportiert.

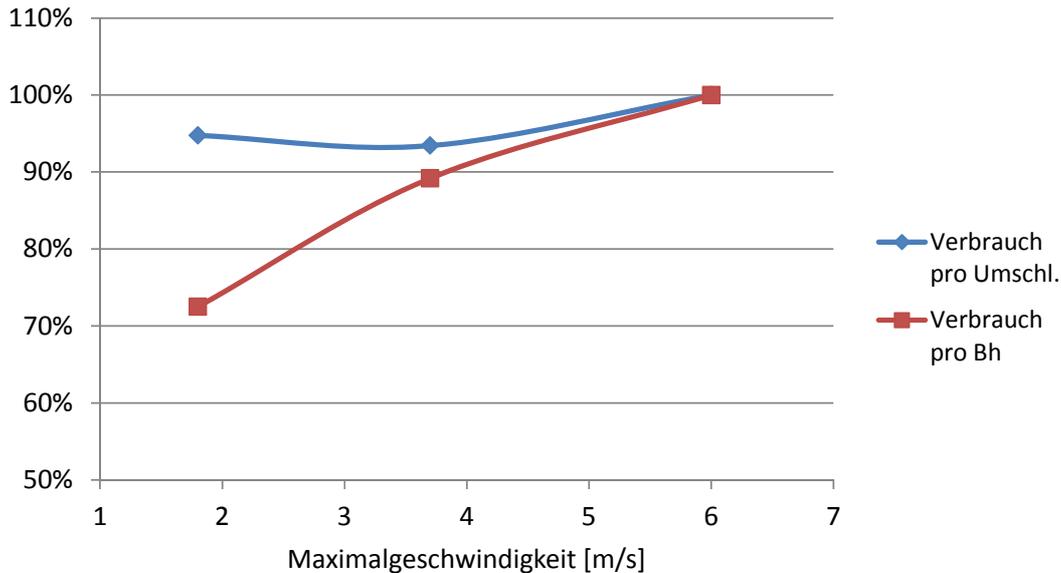
Die gewichtsabhängigen Verbräuche bei Konstantfahrt (Abbildung 83b) werden durch eine Regression der Daten aus Abbildung 83a ermittelt. Dies ist möglich, da der Zusammenhang zwischen Zuladung und Verbrauch in guter Näherung linear ist. Mit diesen Daten und Annahmen wurde eine Verbrauchsberechnung der modifizierten Zyklen durchgeführt (**Abbildung 84**).

Der Zyklusverbrauch pro Betriebsstunde (Abbildung 84, rote Kurve) steigt in etwa proportional zur gefahrenen Maximalgeschwindigkeit an. Der Wert für  $v = 0$  entspricht dabei dem fahrbereiten Zustand des B-AGV mit eingeschalteter Hydraulikpumpe. In diesem befindet sich das Fahrzeug nur wenige Sekunden vor bzw. nach einer Fahrt, da in längeren Leerlaufphasen die Hydraulikpumpe abgeschaltet wird, wodurch der Leistungsbedarf im Leerlauf weit geringer ist (siehe Abschnitt 3.7.5.1).

Der Stromverbrauch bezogen auf einen Containerumschlag (Abbildung 84, blaue Kurve) sinkt im Vergleich zum Referenzzyklus ( $v_{\max} = 6 \text{ m/s}$ ) bei Verlangsamung auf  $v_{\max} = 3,7 \text{ m/s}$  zunächst leicht ab, was im Wesentlichen auf die reduzierten Beschleunigungsvorgänge zurückgeht. Bei einer weiteren Absenkung von  $v_{\max}$  auf  $1,8 \text{ m/s}$  bleibt der Verbrauch pro Umschlag in etwa konstant. Hier reduzieren sich zwar die Beschleunigungsvorgänge abermals, aber der Motor arbeitet nun vornehmlich in einem Drehzahlbereich mit relativ niedrigem Wirkungsgrad.

Der Betrieb bei CTA mit  $v_{\max} = 4 \text{ m/s}$  (anstatt des technisch möglichen  $v_{\max} = 6 \text{ m/s}$ ) hat damit über die genannten logistischen Vorteile hinaus eine leichte Verringerung des Energiebedarfs der B-AGV pro umgeschlagenem Container zur Folge. Inwiefern dies auch auf E-AGV zutrifft, kann auf Basis der vorliegenden Daten nicht ermittelt werden.

Es ist zu beachten, dass die Ableitung der Zyklen mit  $v_{\max} = 3,7 \text{ m/s}$  bzw.  $v_{\max} = 1,8 \text{ m/s}$  aus dem Referenzzyklus sehr einfachen Annahmen folgt (siehe oben) und nicht auf einer logistischen Simulation beruht. Die hier durchgeführte Sensitivitätsanalyse ist daher im Sinne einer ersten Abschätzung zu verstehen.



**Abbildung 84:** Verbrauch des B-AGV pro Betriebsstunde (rot) bzw. pro Umschlag (blau) in Abhängigkeit von  $v_{\max}$ . 100 % entspricht den Werten für  $v_{\max} = 6$  m/s.

### 3.7.5.3 Speicherung rekuperierter Energie in Supercaps

Das in diesem Projekt entwickelte B-AGV kann Bremsenergie in die Traktionsbatterie zurückspeisen. Dies ist jedoch mit Verlusten von über 30 % verbunden. Zudem trägt die Rekuperation in die Batterie zu deren Verschleiß bei. Supercaps bieten hier die Perspektive einer batterieschonenderen Rekuperation mit geringeren Energieverlusten.

Bei Supercaps handelt es sich um sogenannte Doppelschichtkondensatoren, die verglichen mit gewöhnlichen Kondensatoren über eine sehr hohe Kapazität von über 3000 Farad verfügen. Als Energiespeicher zeichnen sie sich durch eine hohe Leistungsdichte bei verhältnismäßig geringer Energiedichte aus. Die mögliche Anzahl der Ladezyklen über die Lebensdauer liegt bei etwa 1'000'000. Supercaps weisen somit ideale Eigenschaften für den Einsatz als Zwischenspeicher für Bremsenergie in Fahrzeugen auf. Daher war im Rahmen des Projekts die Erprobung einer Variante des batterieelektrischen Antriebsstrangs geplant, bei der die rekuperierte Bremsenergie nicht von der Traktionsbatterie, sondern von Supercaps aufgenommen wird.

Durch Simulation dieser Variante durch den Projektpartner ika wurde festgestellt, dass die Energieeinsparung vergleichsweise gering ist (siehe Kapitel 3.5). Die Realisierung dieses Arbeitspunkts im Feldversuch wurde daher nicht weiter verfolgt. In diesem Abschnitt soll jedoch der potenzielle Umweltnutzen eines Einsatzes von Supercaps auf Basis der Simulationsergebnisse abgeschätzt werden.

Bei dieser Betrachtung müssen drei Aspekte berücksichtigt werden:

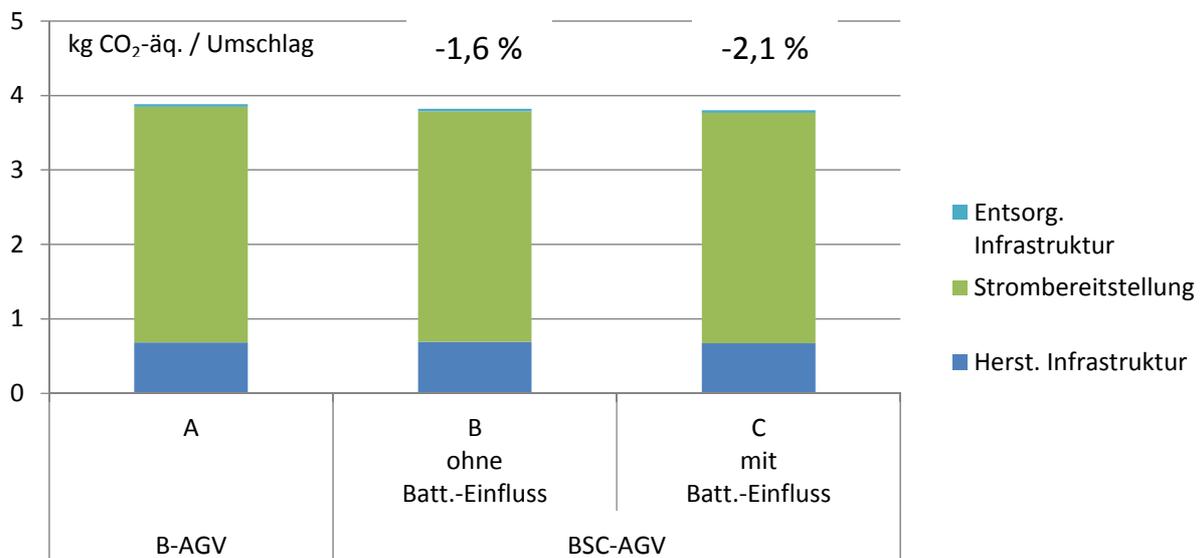
1. zusätzliche Herstellungsaufwendungen für Supercaps und benötigte Zusatzbauteile
2. Änderung des Wirkungsgrads der Rekuperation und damit des Stromverbrauchs
3. Einfluss auf die Lebensdauer der Traktionsbatterie

Zur Abschätzung von 1. konnte teilweise auf Angaben eines Herstellers zurückgegriffen werden [Maxwell 2011]. Demnach bestehen die Supercap-Module etwa zur Hälfte aus Aluminium, außerdem sind gelöste Ammoniumsalze als Elektrolyt, aktivierter Kohlenstoff für die Elektroden sowie kleinere Mengen an Kunststoffen enthalten. Der Energiebedarf der Herstellung wird anhand vergleichbarer Produkte abgeschätzt. Zur Einbindung der

Supercap-Module in den Antriebsstrang ist ein DC-DC-Wandler erforderlich, der auf Basis generischer Daten bilanziert wurde [Ecolnvent 2008].

Die Änderung des Stromverbrauchs im Betrieb (2.) folgt den ika-Simulationsergebnissen. Demzufolge sinkt der Stromverbrauch im Betrieb durch Supercaps gegenüber dem Referenzfahrzeug um 2,3 %.

Die Alterung von Bleibatterien ist im Wesentlichen proportional zum Energiedurchsatz. Laut Aussage des Herstellers Hawker wird die Degradation der Batterie nicht durch die Häufigkeit und Kürze der bei der Rekuperation auftretenden Zyklen beschleunigt [Geile 2011]. Zudem sind die auftretenden Ströme (sowohl beim Fahren als auch beim Rekuperieren) niedrig im Verhältnis zur Kapazität der Batterie. Die Alterung der Batterie pro abgerufener Energieeinheit ist daher gering. Der Einfluss der Supercaps auf die Batterielebensdauer wird daher entsprechend der Reduktion des Energiedurchsatzes durch die Batterie abgeschätzt. Dies sind nach ika-Simulationen etwa 8 %.



**Abbildung 85:** Treibhausgasbilanz über den Lebensweg, mit und ohne Supercaps

Um den Einfluss der einzelnen Faktoren sichtbar zu machen, ist in **Abbildung 85** die Treibhausgasbilanz unter verschiedenen Annahmen dargestellt:

- Referenzfahrzeug ohne Supercaps (Rekuperation direkt in Batterie)
- Fahrzeug mit Supercaps; Batterielebensdauer wie in A
- Fahrzeug mit Supercaps; Batterielebensdauer durch Supercaps um 8 % verlängert

Der Einfluss der Supercaps auf die Gesamtbilanz ist in beiden Fällen sehr gering im Vergleich zu anderen bereits diskutierten Parametern. Der Verbrauchersparnis von 2,3 % steht der zusätzliche Herstellungsaufwand entgegen, so dass sich die Gesamtbilanz im Fall B um etwa 1,6 % verbessert. Berücksichtigt man zusätzlich die verlängerte Batterielebensdauer (Fall C), verbessert sich die Treibhausgasbilanz um weitere 0,5 % auf 2,1 %. Die Vorteile der verlängerten Batterielebensdauer liegen damit ähnlich hoch wie die zusätzlichen Treibhausgasemissionen für die Herstellung der Supercaps.

Entscheidende Parameter der Betrachtung sind somit die Wirkungsgrade der Batterie bzw. des Supercaps. Während bei der Batterie etwa 66,5 % der eingebremsten Energie wieder nutzbar sind, sind es beim Supercap ca. 85 % (bei angenommenen durchschnittlichen Wirkungsgraden von 97 % für den DC-DC-Wandler bzw. 96 % für den Supercap). Bei diesem Verhältnis kann heute nur ein geringer Verbrauchsvorteil realisiert werden. Die Implementierung von Supercaps in AGV hat aus ökologischer Sicht im Vergleich zu anderen Optimierungsmöglichkeiten daher geringere Priorität.

Da Supercaps im Feldversuch nicht zum Einsatz kamen, beruht die Analyse in diesem Abschnitt auf theoretischen Überlegungen und Simulationen. Es handelt sich also um eine erste Abschätzung, die nicht mit Praxisdaten belegt ist.

### 3.7.5.4 Lithium-Ionen-Batterie – Szenarien

Bleibatterien stellen eine seit langer Zeit etablierte Technologie dar. Zudem sind sie günstig in der Anschaffung, der Betrieb ist damit wirtschaftlich gut kalkulierbar. Auf der anderen Seite ist das technische Optimierungspotential jedoch weitgehend ausgeschöpft. So beträgt die theoretische Obergrenze der Energiedichte auf Zellebene bei Bleibatterien etwa 160 Wh/kg, während sie für Li-Ionen-Batterien mehr als doppelt so hoch liegt [Garche 2008]. Weitere Technologien, wie z.B. die Lithium-Luft-Batterie, die noch höhere Energiedichten versprechen, befinden sich derzeit in Entwicklung. Auch in puncto Zyklenfestigkeit und Ladewirkungsgrad sind moderne Li-Ionen-Batterien den Bleibatterien überlegen. Der bessere Ladewirkungsgrad bei Li-Ionen-Batterien geht einerseits auf den niedrigeren Innenwiderstand zurück, liegt aber auch darin begründet, dass Li-Ionen-Batterien – im Gegensatz zu Bleibatterien - nicht überladen zu werden brauchen, um die Lebensdauer zu verlängern. Dabei steigen die Verluste in der Regel überproportional an.

In diesem Abschnitt soll die Relevanz einzelner Batterieparameter für die ökologische Gesamtbilanz des Antriebssystems untersucht werden. Im Feldversuch wurden keine B-AGV mit Li-Ionen-Batterie getestet. Daher wird die Ökobilanz solcher Fahrzeuge hier in Form von Szenarien untersucht. Die Szenarien zur aktuellen Situation beruhen einerseits auf den Ergebnissen einer Marktrecherche des Projektpartners Gottwald und andererseits auf Simulationen des Projektpartners ika. Zukunftsszenarien beruhen dagegen auf IFEU-Recherchen und Annahmen zur technischen Entwicklung, die auch im zeitgleich abgeschlossenen, ebenfalls vom BMU geförderten Projekt „UMBRéLA“ zugrunde gelegt wurden. Im Einzelnen wurden folgende Szenarien definiert:

**Tabelle 20:** Szenariodefinitionen Batterievergleich

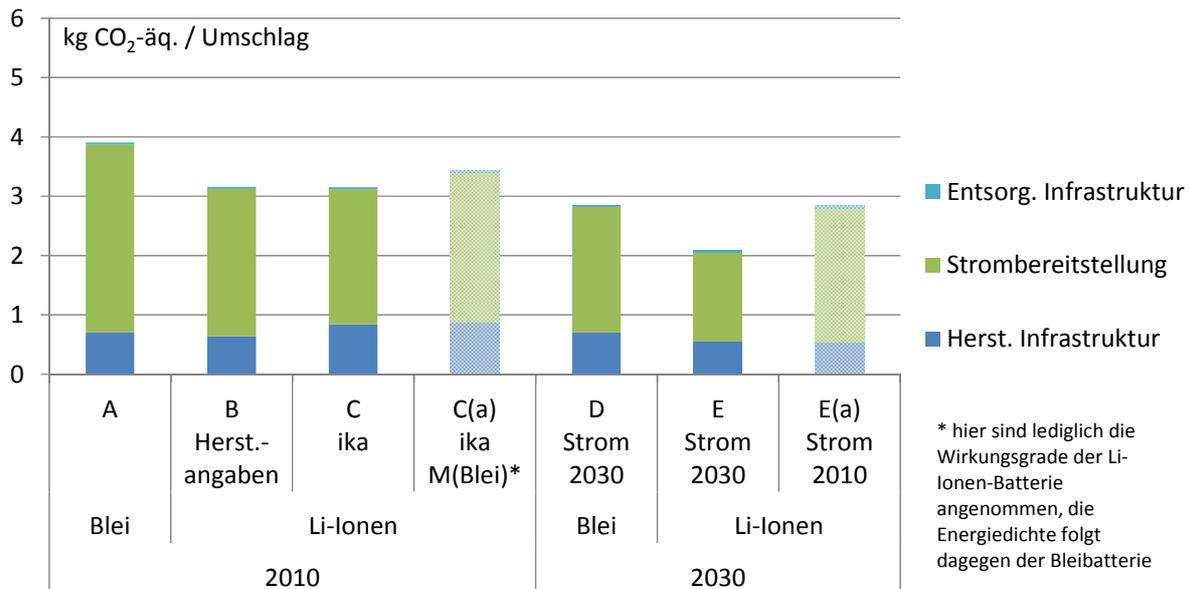
Szenario	Zyklen	Energiedichte [Wh / kg]	Wirkungsgrad (Netz – Batt.)
<b>A</b> - Bleibatt. 2010	1200	31	73 %
<b>B</b> - Li-Ionen-Batt. 2010 (Herstellerangaben)	2000	68	87 %
<b>C</b> - Li-Ionen-Batt. 2010 (ika-Simulation)	1000	137	93 %
<b>D</b> - Bleibatt. 2030	1200	31	73 %
<b>E</b> - Li-Ionen-Batt. 2030	5000	200	93 %

IFEU 2011

Die Szenarien A und B sind bereits aus Kapitel 3.7.3 bekannt. Szenario B greift dabei auf jene Herstellerangaben zurück, die in Kapitel 3.6. als „Variante 2“ dargestellt werden. Diese werden als repräsentativer für den aktuellen Stand der Technik angesehen als „Variante 1“. Szenario C beruht auf Batteriezellen, deren Eigenschaften detailliert vom Projektpartner ika auf dem Prüfstand vermessen wurden. Sie stammen vom Hersteller Sanyo und werden beispielsweise von der Firma TESLA in Elektro-Pkw eingesetzt. Diese Zellen sind auf eine hohe Energiedichte und geringe Verluste beim Laden und Entladen optimiert; ihre Zyklenlebensdauer ist jedoch deutlich geringer als in Szenario B und vergleichbar mit der Bleibatterie. Mit Ausnahme der Zyklenlebensdauer entspricht Szenario C im Wesentlichen der Variante 1 in Kapitel 3.6.

Bei Bleibatterien handelt es sich um eine ausgereifte und seit langem erforschte Technologie, bei der für die Zukunft nur noch mit geringen Verbesserungen zu rechnen ist. Szenario D entspricht daher hinsichtlich der Batterieparameter dem Szenario A. Bei der Li-Ionen-Batterie wird für die Zukunft davon ausgegangen, dass sich sowohl

Zykluslebensdauer als auch Energiedichte deutlich erhöhen (Szenario E). Der angenommene Wert für die Zyklenanzahl wird bereits heute von einigen Batterietypen auf Lithium-Ionen-Basis erreicht ([PSI 2010]). Im AGV-Betrieb entspricht diese Zyklenanzahl einer Betriebsdauer von etwa 13 Jahren, so dass dann in zunehmendem Maße auch die kalendarische Lebensdauer eine Rolle spielen dürfte, die für 2030 mit 15 Jahren angenommen wird. Die Energiedichte im Szenario E entspricht dem Entwicklungsziel der Bundesregierung im Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität ([Bundesregierung 2009]). Der angenommene Wirkungsgrad ist wesentlich vom Ladegerät bestimmt. Da hier bereits heute ein hoher Entwicklungsstand erreicht ist, sind weitere Verbesserungsmöglichkeiten wahrscheinlich begrenzt.



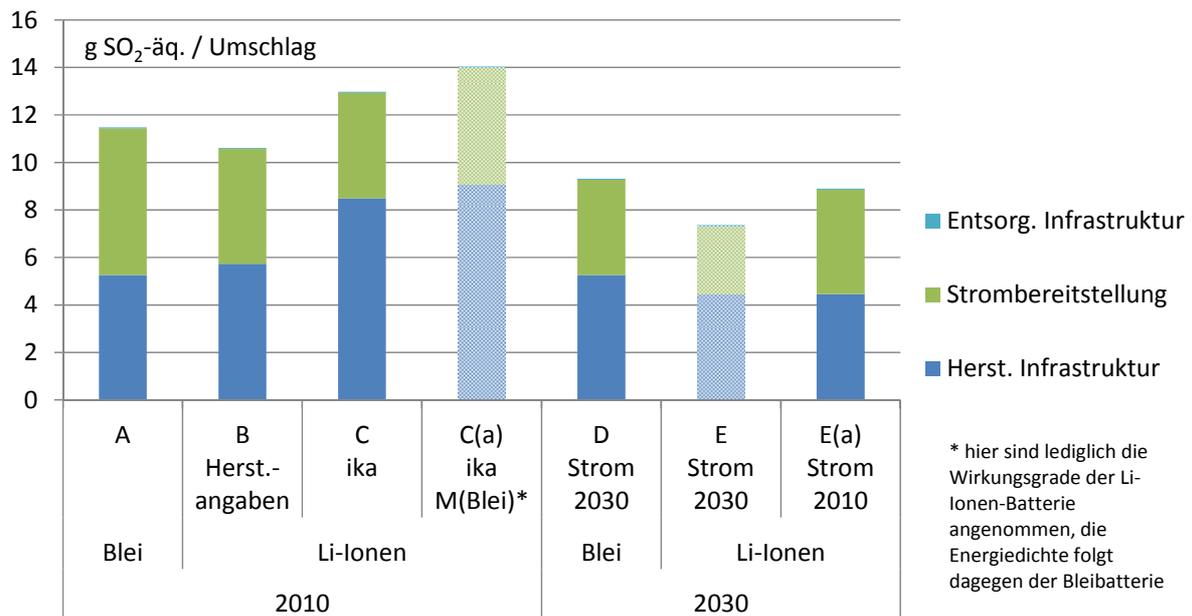
**Abbildung 86:** Treibhausgasbilanz der Batterieszenarien

**Abbildung 86** zeigt die Treibhausgasbilanz der verschiedenen Szenarien über den Lebensweg. Gegenüber dem Referenzszenario A zeigen alle übrigen Szenarien deutlich verbesserte Bilanzen, in den Szenarien B und C gehen die Emissionen gegenüber A um etwa 20 % zurück. Das liegt in erster Linie an den durchweg höheren Wirkungsgraden von Li-Ionen-Batterien. Die Energiedichte und die Zyklenanzahl spielen für die Gesamtbilanz eine etwas geringere Rolle. Dies zeigt Szenario C(a), wo gegenüber A lediglich die Wirkungsgrade an die Li-Ionen-Batterie angepasst wurden. Trotz unterschiedlicher Parameter zeigen die Szenarien B und C eine ähnliche Lebenswegbilanz bei der Klimawirkung, da sich die jeweiligen Vor- bzw. Nachteile der Batteriekonzepte bei der Herstellung bzw. beim Fahrzeugbetrieb in etwa kompensieren.

Bei den Zukunftsszenarien D und E wird für die Betankung der B-AGV ein Strommix verwendet, wie er in [DLR 2010] als Durchschnitt für das Jahr 2030 angenommen wird. Dieser enthält einen höheren Anteil erneuerbarer Energien von 52 % (Abbildung 81). In der Gesamtbilanz liegt die Bleibatterie (Szenario D) damit etwa auf dem Niveau der Li-Ionen-Batterie 2010 (B und C).

Die THG-Emissionen der Li-Ionen-Batterie 2030 (Szenario E) gehen gegenüber B und C um ein Drittel zurück. Ein großer Teil dieser Reduktion ist allerdings auf den geänderten Kraftwerkspark im Jahr 2030 zurückzuführen, wie Szenario E(a) zeigt. Dieses entspricht in allen Parametern dem Szenario E, verwendet aber den derzeitigen Strommix 2010. Lediglich die verbliebene THG-Minderung um etwa 10 % ist damit auf die Verbesserung der Batterieparameter zurückzuführen. Die Ergebnisse zeigen, dass bei den für 2030 angenommenen Parametern die Umweltwirkungen nicht mehr vom Einfluss der Traktionsbatterie dominiert werden, sondern andere Faktoren zunehmend eine Rolle spielen, insbesondere der verwendete Strommix, die Fahrwiderstände sowie der

Herstellungsaufwand für den Rest des Fahrzeugs. Auch hier sollten weitere Optimierungsmöglichkeiten ausgeschöpft werden.



**Abbildung 87:** Versauerungspotential der Batterieszenarien über den Lebensweg

Bei den Schadstoffemissionen spielt die Herstellung der Batterien im Verhältnis zum Fahrzeugbetrieb eine größere Rolle als bei der Klimawirkung, was **Abbildung 87** am Beispiel der Versauerung zeigt. Eine niedrige Zyklenanzahl der Batterie (die dementsprechend häufig ausgetauscht werden muss), wie in Szenario C, führt hier zu einer starken Verschlechterung der Gesamtbilanz, da im Hafenbetrieb die Zyklenfestigkeit entscheidend für die Lebensdauer ist (sofern sie niedriger als etwa 5000 Zyklen liegt). Umgekehrt kann somit eine deutliche Verbesserung dieses Parameters, wie für 2030 angenommen (Szenario E), die Umweltwirkungen stark reduzieren.

Weitere Verbesserungen der Herstellungsbilanz der Lithium-Ionen-Batterie könnten durch ein Recycling wichtiger Materialien wie z.B. Lithium erreicht werden. Aktuelle Forschungen dazu werden ebenfalls vom BMU gefördert. Die Ergebnisse dieser Projekte konnten jedoch nicht mehr in diesen Bericht einfließen.

## 3.7.6 Umweltwirkungen von Strategien zum gesteuerten Laden

### 3.7.6.1 Hintergrund des gesteuerten Ladens

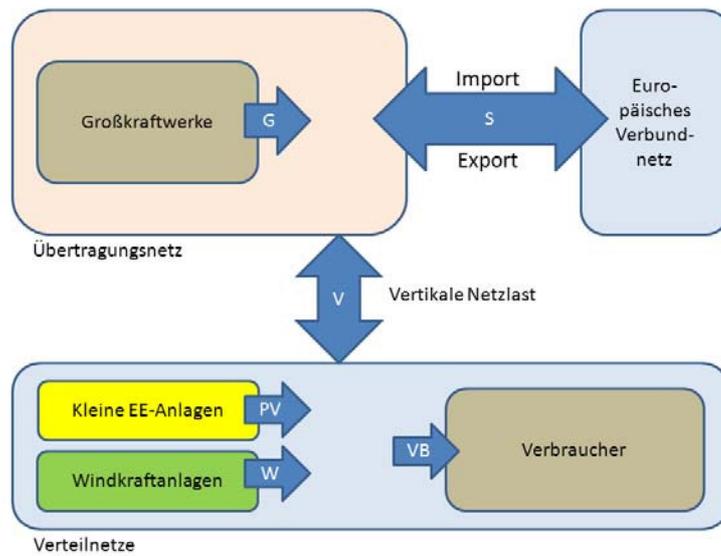
Mit dem zunehmenden Ausbau fluktuierender erneuerbarer Energien, insbesondere der Windenergie, geht die Notwendigkeit einher, Stromerzeugung und -verbrauch zeitlich möglichst gut in Übereinstimmung zu bringen. So kann die Notwendigkeit zur Zwischenspeicherung von Energie bzw. der Transport über weite Strecken verringert werden. Die damit verbundenen hohen Infrastrukturkosten und energetischen Verlusten werden damit vermieden, und gleichzeitig die Versorgungssicherheit erhöht. Ein Ansatz dabei ist es, den Verbrauchern mitzuteilen, wann der Verbrauch seitens der Energieversorger netztechnisch günstig ist. Ein solches Netzsignal ermöglicht dann bei flexiblen Prozessen eine Anpassung des Stromverbrauchs.

Die im Feldversuch eingesetzte Batteriewechselstation ist mit solch einer Schnittstelle zum Empfang von Steuerungssignalen des Stromnetzbetreibers ausgerüstet und somit in der Lage, ihr Ladeverhalten an die aktuelle Netzsituation anzupassen (siehe Kapitel 3.3). Da während des Projekts allerdings nur zwei B-AGV und vier Wechselbatterien im Einsatz waren, lassen sich aus dem Feldversuch nur begrenzt Rückschlüsse auf die Situation einer kompletten B-AGV-Flotte ziehen. In diesem Kapitel werden daher anhand von Simulationen die Konsequenzen einer Optimierung der Ladestrategie für eine gesamte AGV-Flotte untersucht.

Die für die folgende Untersuchung relevanten Energieflüsse im Stromnetz sind in **Abbildung 88** dargestellt. Das CTA bezieht seinen Strom aus dem Hamburger Verteilnetz, das wiederum an das Übertragungsnetz der 50Hertz Transmission GmbH angeschlossen ist. Dieses Netz umfasst mit Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg zwei Bundesländer mit einem hohen Anteil von Windenergie an der Erzeugung. Der Übertragungsnetzbetreiber stellt für seine Regelzone umfangreiche historische Daten zu verschiedenen Netzparametern zur Verfügung, darunter die zeitaufgelösten Werte für

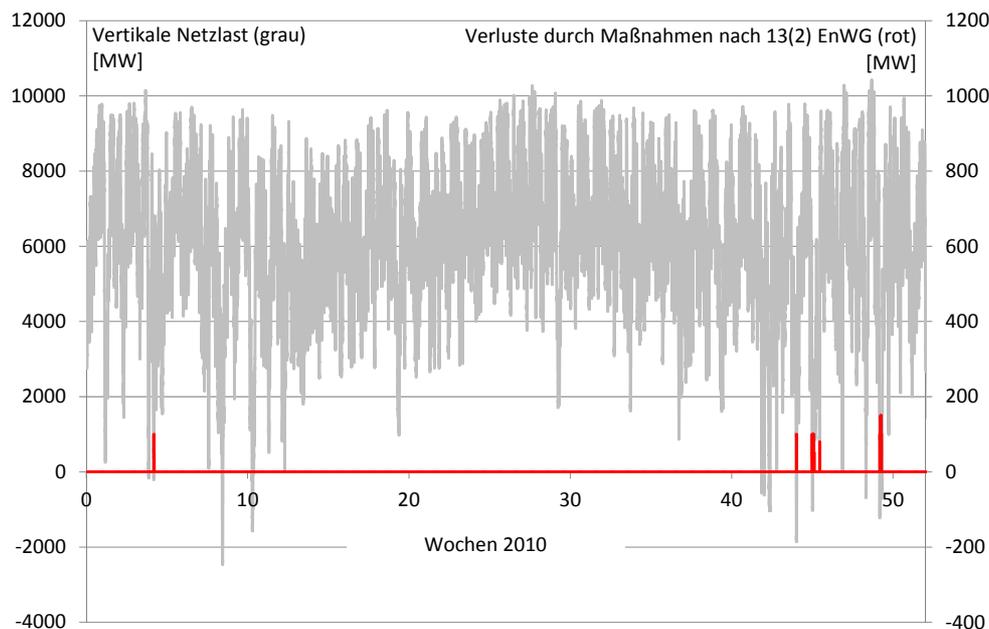
- die gesamte Stromerzeugung,
- die Einspeisung von Windkraftanlagen,
- die vertikale Netzlast (den Lastfluss zwischen Übertragungsnetz und angeschlossenen Verteilnetzen und
- den Stromim- und -export über die Grenzen der Regelzone.

Im Folgenden werden Netzdaten des Jahres 2010 zugrunde gelegt.



**Abbildung 88:** Vereinfachte schematische Darstellung des deutschen Stromnetzes

Für Strom aus erneuerbaren Energien gilt nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ein Einspeisevorrang. Allerdings hat der Netzbetreiber das Recht, EE-Anlagen ganz oder teilweise herunterzufahren, sobald Gefahr für die Stabilität des Netzes besteht (sogenanntes Einspeisemanagement). Von dieser Möglichkeit wird derzeit jedoch nur in geringem Umfang Gebrauch gemacht, wie aus **Abbildung 89** ersichtlich ist. Einspeisemanagement trat demnach immer in Kombination mit einer negativen Spitze der vertikalen Netzlast, also einem bilanziellen Rückfluss von Strom aus dem Verteilnetz ins Übertragungsnetz auf. Auf ganz Deutschland bezogen sind im Jahr 2009 etwa 0,2 % des erzeugten Windstroms abgeregelt worden [Ecofys 2011].



**Abbildung 89:** Vertikale Netzlast und Verluste durch Einspeisemanagement 2010

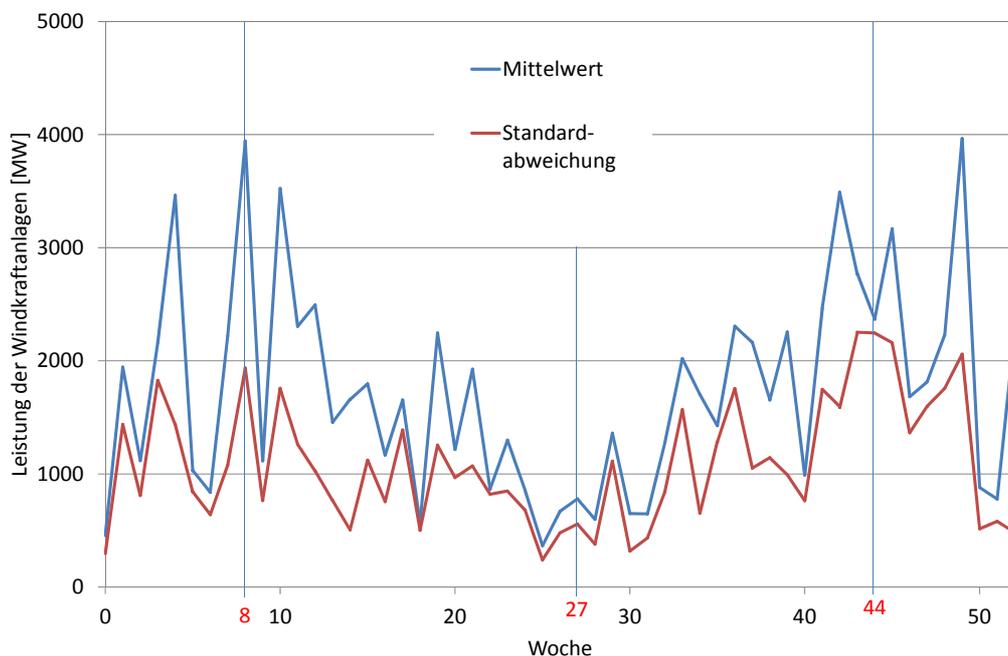
### 3.7.6.2 Simulation der Ladezeitverschiebung

Der Hafenbetrieb unterliegt einem im Wesentlichen zyklischen Verlauf, der sich im Wochenrhythmus wiederholt. Als Basis für die Untersuchung von Ladestrategien wurde vom Projektpartner Gottwald ein typisches Nutzungsprofil für eine AGV-Flotte während einer Kalenderwoche definiert (Abbildung 24). Der Verlauf der Ladeleistung, der auftritt, wenn die Batterien stets direkt nach Eintreffen in der Wechselstation aufgeladen werden, ist ebenfalls gezeigt.

Die Ladedauer einer Batterie beträgt etwa 7 Stunden. Aufgrund der im Feldtest ermittelten Stromverbräuche des B-AGV im Betrieb kann von einer Betriebsdauer von etwa 12 Stunden ausgegangen werden. Unter der Annahme, dass jedem AGV zwei Wechselbatterien fest zugeordnet sind, ergibt sich daraus eine Flexibilität bei der Terminierung der Ladezeit von 5 Stunden. Bei einer kompletten B-AGV-Flotte, freier Kombinierbarkeit zwischen Fahrzeugen und Batterien sowie einem im Voraus bekannten Bedarf an Fahrleistung ergeben sich darüber hinaus weitere Freiheitsgrade für die Verschiebung von Ladezeiten.

Die möglichen Verschiebungen werden im Folgenden für drei verschiedene Netzsignale untersucht. Ziel bei deren Auswahl war es, jeweils eine typische Woche der Jahreszeiten Frühling, Sommer und Herbst abzubilden. Dazu wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen der Windeinspeisung für sämtliche Wochen des Jahres 2010 ausgewertet (**Abbildung 90**). Ausgewählt wurden

- Woche 8 (Frühling; kräftiger relativ konstanter Wind) – „Woche A“
- Woche 27 (Sommer; schwacher Wind) – „Woche B“
- Woche 44 (Herbst; stark schwankend) – „Woche C“



**Abbildung 90:** Mittelwert und Varianz der Windenergieeinspeisung 2010 (Wochenwerte)

Das Signal, das der Batteriewechselstation die aktuelle Netzbewertung anzeigt, berechnet sich aus dem Quotienten von Windenergieprognose und der Prognose für die gesamte Erzeugung in der Regelzone. Es ist somit ein Maß für den „Anteil“ an Windenergie im Netz. Das Signal wurde für die ausgewählten Wochen berechnet und in das Modell des Projektpartners Gottwald eingespeist. Dieses führte eine Optimierung der Ladezeiten durch und ermittelte die zeitabhängige Anzahl von Batterien, die zu einem bestimmten Zeitpunkt geladen werden. Die Optimierung wurde für eine Flottengröße von 84 Fahrzeugen und

Batterieanzahlen von 129 bzw. 168 durchgeführt. Die Erstere entspricht in etwa der logistisch notwendigen Mindestanzahl, um auch in Zeiten hoher Terminalauslastung einen reibungslosen Betrieb garantieren zu können. Die Letztere entspricht zwei Batterien pro AGV und vergrößert die Flexibilität hinsichtlich der Planung des Batterieeinsatzes. Wenn nicht anders angegeben, ist im Folgenden das Szenario mit 168 Batterien gemeint.

Die **Abbildungen 91-93** zeigen für die Wochen A-C den Verlauf des Netzsignals sowie die Ergebnisse der Ladezeitoptimierung im Vergleich zu der nicht optimierten Variante. Die optimierte Ladekurve erreicht gegenüber der ungesteuerten Ladekurve eine deutlich größere Übereinstimmung mit dem Netzsignal. Das Netzsignal bildet den zeitabhängigen Anteil der Windenergie an der gesamten Einspeisung ab. Somit lässt sich durch Integration des Produktes aus Netzsignal und Ladeleistung über den Zeitraum einer Woche der Windkraftanteil am Ladestromverbrauch dieser Woche berechnen. Dies wurde für normales sowie für optimiertes Laden durchgeführt (Tabelle 21).

**Tabelle 21:** Überblick Ladezeitoptimierung

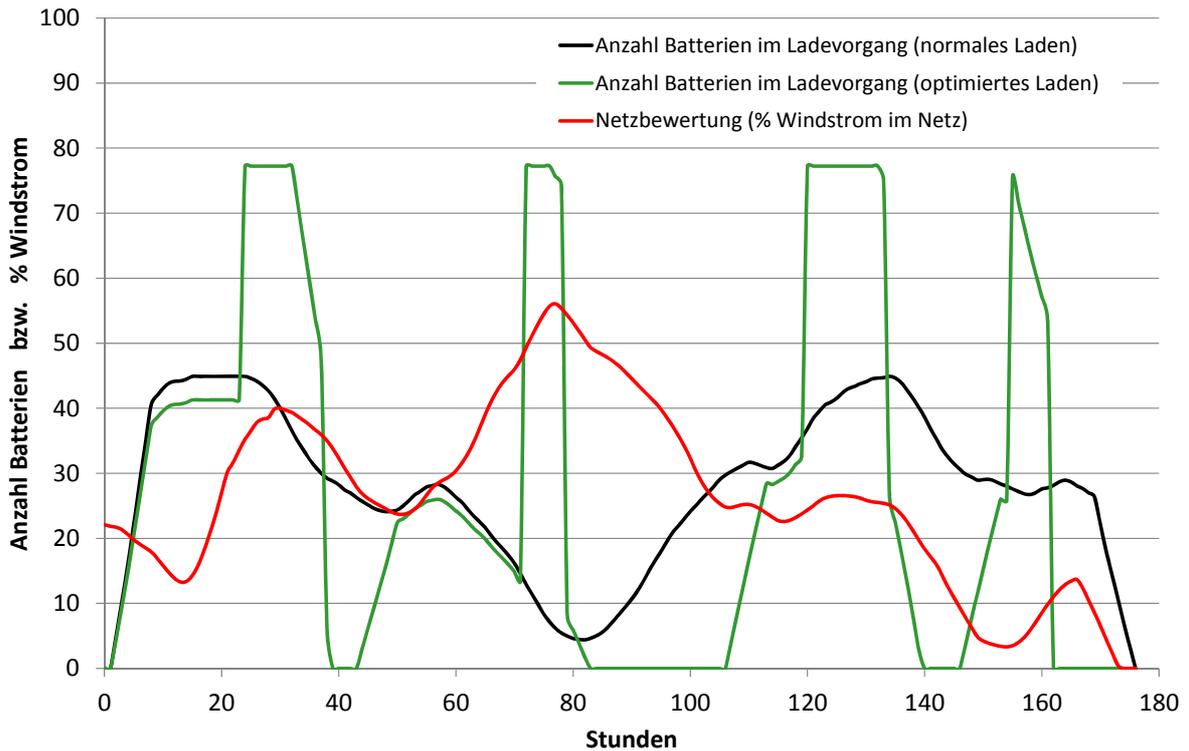
		Anteil Windstrom im Netz			
Woche	Datum	129 Batt.		168 Batt.	
		normal	optimiert	normal	optimiert
A	26.2. – 4.3.	24,6%	26,9%	24,6%	28,6%
B	9.7. – 15.7.	9,8%	11,5%	9,8%	13,2%
C	5.11. – 11.11.	21,4%	23,1%	21,4%	24,1%

IFEU 2011

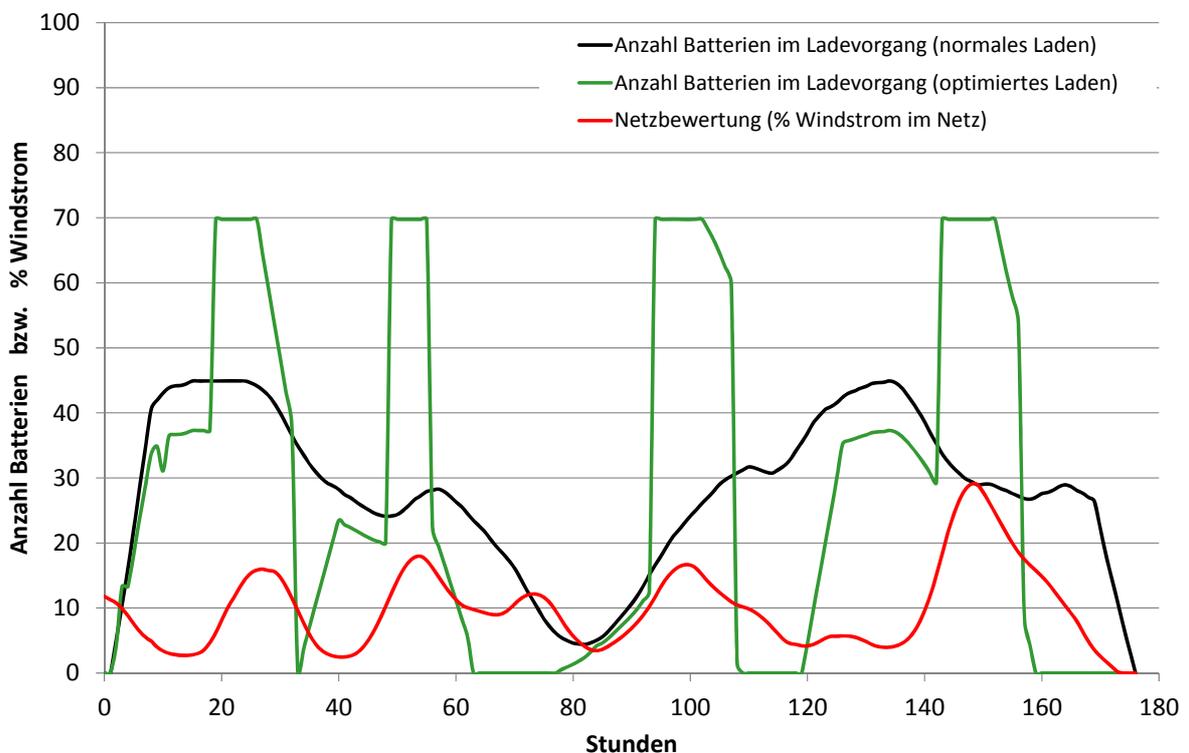
Am deutlichsten zeigt sich die Verschiebung im Frühjahr (Woche A); hier nimmt der Windstromanteil um etwa 4 % zu. Auch im Sommer (Woche B) steigt der Anteil um etwa 3,5 %, allerdings liegt der gesamte Windkraftanteil hier nur etwa halb so hoch wie in Woche A. Im Herbst ist die Varianz der Windeinspeisung am höchsten; nach starker Einspeisung zu Beginn der Woche stagniert der Windkraftanteil für mehrere Tage auf niedrigem Niveau und steigt erst gegen Ende der Woche wieder an. Hier reicht die Flexibilität des AGV-Systems mit der gegebenen Anzahl von Batterien nicht aus, um Ladevorgänge während der „ungünstigen“ Zeit in der Wochenmitte zu vermeiden. Der Windanteil kann daher im Vergleich zu den Wochen A und B nur in einem geringeren Maße gesteigert werden (ca. 2,7 %).

Wird die Simulation mit nur 129 Batterien im System durchgeführt, so sinkt die verschobene Strommenge um mehr als die Hälfte, da das zur Verfügung stehende Ladezeitfenster für jede einzelne Batterie entsprechend kleiner wird. Da die Einsatzzeit (ca. 12 Stunden) deutlich über der Ladezeit (ca. 7 Stunden) liegt, wäre ein solches System logistisch jedoch funktionsfähig. Für die Bereitstellung zusätzlicher Batteriekapazitäten zum gesteuerten Laden dürften ökonomische Anreize notwendig sein, um die höheren Anfangsinvestitionen in die Traktionsbatterien zu kompensieren und die Bindung von zusätzlichem Kapital zu rechtfertigen. Die Batteriekosten sind über die Lebensdauer gesehen allerdings nur dann höher, wenn durch den geringen Nutzungsgrad der Batterien deren Lebensdauer in Folge kalendarischer Effekte begrenzt wird.

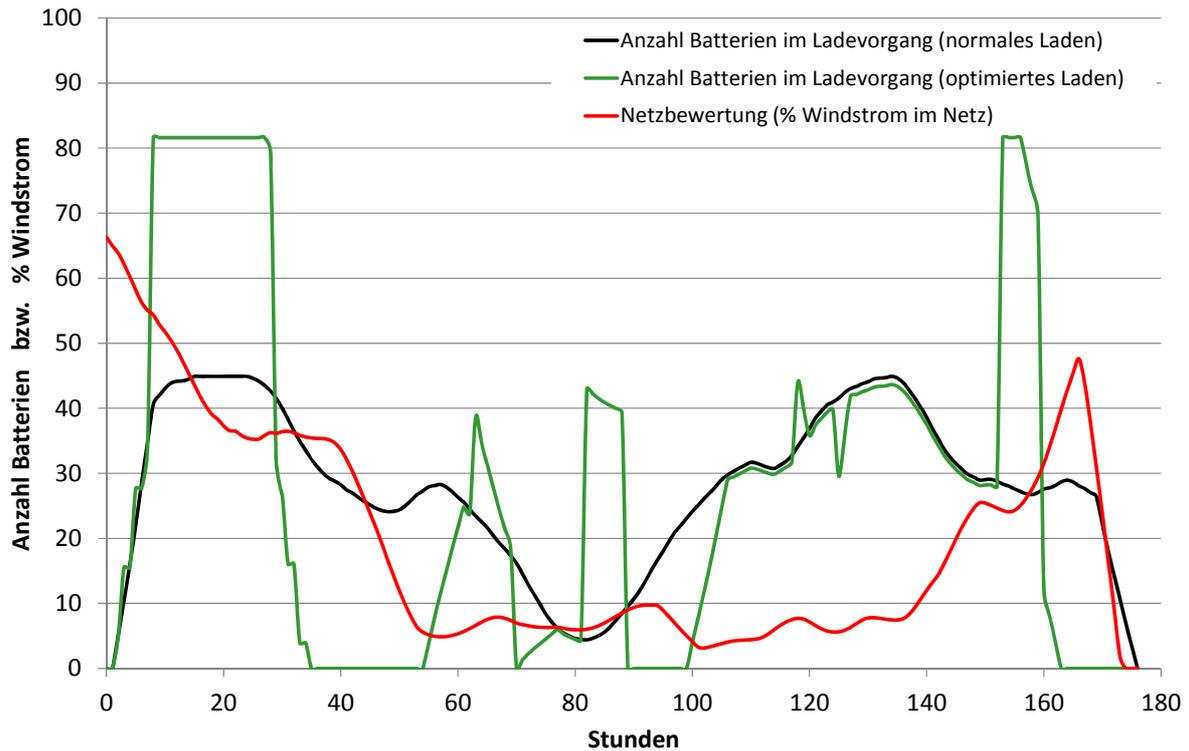
Die Simulation basiert auf Netzdaten des Jahres 2010. Zukunftsszenarien zum gesteuerten Laden, die Änderungen der Energieversorgung und des Stromnetzes reflektieren, konnten im Rahmen dieses Projekts nicht untersucht werden, da die zugrundeliegenden Netzparameter nicht nur von der Zusammensetzung des Kraftwerksparks, sondern von zahlreichen weiteren ökonomischen und netztechnischen Faktoren abhängen.



**Abbildung 91:** Ergebnisse der Flottensimulation für die Woche A (26.2.2010 – 4.3.2010), 168 Batterien



**Abbildung 92:** Ergebnisse der Flottensimulation für die Woche B (9.7.2010 – 15.7.2010), 168 Batterien



**Abbildung 93:** Ergebnisse der Flottensimulation für die Woche C (5.11.2010 – 11.11.2010), 168 Batterien

### 3.7.6.3 Umweltwirkungen durch die Ladezeitverschiebung

Bei der Stromerzeugung ist die physische Kopplung zwischen Erzeugung und Verbrauch indirekt und komplex. Dadurch ist es schwierig, den anteiligen Beitrag einzelner Kraftwerkstypen und damit die Umweltwirkungen einer Stromentnahme aus dem Netz zu einem spezifischen Zeitpunkt zu bestimmen. Zwei verschiedenen Betrachtungen bieten sich an:

- Der **Durchschnittsstrommix** gibt an, welchen Beitrag die einzelnen Kraftwerkstypen im Laufe eines beliebigen Zeitraums zum gesamten ins Netz eingespeisten Strom leisten.
- Der **Marginalstrommix** gibt an, welche Kraftwerke zugeschaltet werden, um einen zu einer bestimmten Zeit im Netz auftretenden zusätzlichen Strombedarf zu decken.

Zum Durchschnittsstrommix und insbesondere zum darin enthaltenen Anteil erneuerbarer Energien stehen historische Daten zur Verfügung. Der Marginalstrommix hingegen kann nur für konkrete Situationen mithilfe komplexer Modelle berechnet werden, die sowohl technische Aspekte des Netzbetriebs als auch ökonomische Faktoren berücksichtigen (siehe z.B. [Pehnt et al. 2011]). Dies konnte im Rahmen des Projekts nicht geleistet werden.

Die Ergebnisse beruhen daher auf einer durchschnittlichen und nicht auf einer marginalen Betrachtung. Derzeit wird so gut wie alle verfügbare Energie aus erneuerbaren Quellen ins Netz eingespeist und zusätzlicher Strombedarf im Netz im Wesentlichen durch thermische Kraftwerke gedeckt, unabhängig davon, wann dieser Bedarf auftritt. Eine Untersuchung des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung zu Ladestrategien für Elektro-Pkw kommt zu dem Ergebnis, dass sich die Zusammensetzung eines Marginalmixes bei gesteuertem Laden zugunsten von Grundlastkraftwerken ändert, die von einer „geglätteten“ vertikalen Netzlast profitieren [Pehnt et al. 2011]. Bei diesen Kraftwerken handelt es sich aber in erster Linie um Kohlekraftwerke, die höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweisen als der Durchschnitt des Kraftwerksparks. **Entscheidend für den Umweltnutzen von Maßnahmen**

### **zum gesteuerten Laden ist daher der gleichzeitige zusätzliche Ausbau erneuerbarer Energien.**

Die Verschiebung der Ladezeiten kann aber zusätzlich einen unmittelbaren Beitrag dazu leisten, den Stromexport über die Grenzen der Regelzone der 50Hertz Transmission GmbH zu verringern. So können Verluste vermieden werden, die bei der überregionalen Energieübertragung entstehen, da der Stromexport aus der Regelzone hinaus weitgehend proportional zur Windenergieerzeugung innerhalb der Regelzone ist.

Die netzbedingte Abregelung von Windenergie kann heute noch vernachlässigt werden. Mit weiter steigendem Anteil an fluktuierenden Energien könnte sich dies jedoch ändern. Dann wird es zunehmend wichtig, den Verbrauch dynamisch in Zeiten absolut gesehen höchster Windenergieerzeugung („Windspitzen“) zu verlagern. In dieser Hinsicht sind vor allem die möglichen Verschiebungen in den Wochen A und C interessant, da im Sommer (Woche B) die Windenergieerzeugung absolut gesehen gering ist.

Eine weitere Möglichkeit des gesteuerten Ladens ist die Lastverlagerung von Spitzenlastzeiten hin zu Zeiten geringerer Netzbelastung. Dadurch kann die Reserveleistung verringert werden, die zur Abfederung von Lastspitzen vorgehalten werden muss. Soll durch das gesteuerte Laden Spitzenlast verlagert werden, so muss dies jedoch bei der Erstellung des Netzsignals berücksichtigt werden; dies ist bei dem im Projekt verwendeten und hier zugrunde gelegten Signal nicht der Fall.

Perspektivisch wird die gesetzliche Begünstigung<sup>4</sup> von Windenergie abnehmen, so dass zunehmend das Marktgeschehen über ihren Ausbau entscheiden wird. Je wirkungsvoller die Instrumente sind, mit denen die Verbraucher auf das schwankende Windangebot reagieren können, desto bessere Preise werden sich künftig mit Windenergie am Markt erzielen lassen, was wiederum ihren weiteren Ausbau attraktiver macht. Die aktuelle Novelle des EEG versucht bereits, diese Entwicklung über entsprechende Anreize vorzubereiten [EEG 2011], beispielsweise mithilfe einer sogenannten Marktprämie, die es Betreibern von EE-Anlagen erleichtern soll, ihren Strom direkt am Markt anzubieten.

Die Untersuchung zum gesteuerten Laden hat gezeigt, dass die Ladezeiten der Wechselbatterien zu einem signifikanten Teil in Zeiten höherer Windstromerzeugung verschoben werden können, ohne die Produktivität der AGV im Hafenbetrieb zu beeinträchtigen. Für eine reine B-AGV-Flotte lässt sich so der Windenergieanteil im Ladestrom um mehrere Prozent steigern, abhängig von der Anzahl der Wechselbatterien im System. Damit kann der Hafen einen Beitrag zu besserer Integration fluktuierender erneuerbarer Energien leisten.

### **3.7.7 Schlussfolgerungen**

Der globale Handel wird heute zum großen Teil über die Seehäfen abgewickelt, die durch stärkere Automatisierung und Technisierung lokal ein relevanter Energieverbraucher und Emittent von Klimagasen und Schadstoffen sind. Damit stellen sich ähnliche Fragen wie im Bereich des Straßenverkehrs: **Wie können CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionen signifikant gesenkt und gleichzeitig die Abhängigkeit von den endlichen fossilen Ressourcen reduziert werden?**

Als Lösungsansatz wurden im Rahmen des Projektes „Batteriebetriebene Schwerlastfahrzeuge im Containerterminal Altenwerder“ getestet. Der Fahrzeugbetrieb ist, verglichen mit verbrennungsmotorischen Antriebssystemen, hocheffizient und erzeugt keine lokalen Emissionen. Zusätzlich wird die Energieträgerbasis deutlich verbreitert und es werden auch erneuerbare Energien nutzbar gemacht. Da die Ladedauer der Batterien ein Vielfaches des Tankvorgangs beträgt, werden entladene Batterien in einer Batteriewechselstation innerhalb weniger Minuten gegen geladene Batterien getauscht; so wird eine hohe Verfügbarkeit der Schwerlastfahrzeuge gewährleistet.

---

<sup>4</sup> Einspeisevergütung sowie Einspeisevorrang nach EEG

Um die Umwelteffekte zu quantifizieren, wurde im Rahmen der ökologischen Begleitforschung ein ökobilanzieller Vergleich des bisherigen diesel-elektrischen (E-AGV) mit dem neuen batterie-elektrischen Antriebssystem (B-AGV) durchgeführt. Dabei wurde der gesamte Lebensweg der AGV-Systeme betrachtet: Von der Herstellung der Fahrzeuge, Batterien und Betankungs- bzw. Ladeinfrastruktur über die Fahrzeugnutzung und Bereitstellung der dazu benötigten Energie bis zur Fahrzeugentsorgung bzw. dem Recycling von Materialien. Der Fokus der Betrachtung lag auf den differierenden Komponenten der Fahrzeuge (insbesondere der Batterie) und der Nutzungsphase. Die weiteren Komponenten wurden nur überschlägig über den Materialeinsatz bilanziert.

Aus den Ergebnissen der ökologischen Begleitforschung lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ableiten:

1. Die **Klimawirkung** der B-AGV hängt wesentlich vom verwendeten Strommix ab, liegt aber in allen Szenarien deutlich unter der Klimawirkung des E-AGV-Systems. Bereits bei Nutzung des heute durchschnittlichen deutschen Stroms werden die Treibhausgasemissionen pro Container-Umschlag um etwa 33 % gesenkt (inklusive der Fahrzeugherstellung). Durch den im Projekt verwendeten Ökostrom wurde die Klimawirkung sogar um über 60 % gesenkt. Bei Nutzung von Strom aus zusätzlichen Anlagen zur Erzeugung regenerativen Stroms (z.B. Windkraft) kann darüber hinaus eine Minderung der Klimawirkung um etwa 85 % erreicht werden. Die geringen THG-Emissionen beim B-AGV-Betrieb mit erneuerbarer Energie dürfen jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass auch hier große Energiemengen verbraucht werden, die damit an anderer Stelle nicht zur Verfügung stehen.
2. Auch die **Energieeffizienz** des B-AGV-Systems inklusive der Strombereitstellung ist deutlich höher, der kumulierte Energieaufwand pro Container-Umschlag liegt etwa 25 % unter dem der E-AGV.
3. Die **lokalen Schadstoffemissionen** werden vollständig vermieden. Bei der Versauerung ergibt sich zudem in allen betrachteten Szenarien auch über den Lebensweg eine deutliche Reduktion durch das B-AGV-System gegenüber dem E-AGV-System zwischen 70 % und 85 %. Die Feinstaubemissionen werden dagegen in der Betrachtung über den Lebensweg stark durch die Fahrzeug- und Batterieherstellung bestimmt und liegen damit für beide Systeme in einer ähnlichen Größenordnung.
4. Der überwiegende Teil der Emissionen wird durch den deutlich **verringerten Leerlaufverbrauch** der B-AGV erreicht. Insbesondere bei Anwendungen mit hohem Leerlaufanteil führt eine Elektrifizierung also zu überdurchschnittlichen Umweltvorteilen.
5. Die Rückgewinnung von Bremsenergie im Betrieb senkt den Energieverbrauch um etwa 8 %. Der Einsatz von **Supercaps** würde nur eine geringe zusätzliche Energieersparnis bewirken.
6. Die Umweltbilanz könnte tendenziell durch den Einsatz von **Lithium-Ionen-Batterien** verbessert werden. Dies geht vor allem auf den besseren Ladewirkungsgrad der Li-Ionen-Batterie und deren geringeres Gewicht und damit geringeren Energieverbrauch der Fahrzeuge zurück.
7. Durch Ausrichtung der Ladestrategie an der Windenergieprognose (**gesteuertes Laden**) können die Ladezeiten der Wechselbatterien in Zeiten höherer Windstromerzeugung verschoben werden, ohne die Produktivität der AGV im Hafenbetrieb zu beeinträchtigen. Für eine reine B-AGV-Flotte lässt sich so der Windenergieanteil im Ladestrom um mehrere Prozent steigern, abhängig von der Anzahl der Wechselbatterien im System. Damit leistet der Hafen einen Beitrag zu besserer Integration fluktuierender erneuerbarer Energien.

Die Elektrifizierung von AGV stellt sich damit auch im Vergleich mit der Elektrifizierung von Pkw günstig dar: So ergeben sich für die Klimawirkung von batterieelektrischen Elektro-Pkw die heute mit durchschnittlichem deutschen Strommix betrieben werden noch keine deutlichen Vorteile gegenüber konventionellen Pkw mit Verbrennungsmotor (siehe [Helms et al. 2010], [Pehnt et al. 2011]). Die vergleichsweise günstige Bilanz des B-AGV (25 % Minderung bei Nutzung durchschnittlichen deutschen Strommix) wird zum großen Teil durch die Vermeidung des Energieverbrauchs im Leerlauf erreicht: Dieser verursacht beim diesel-elektrischen AGV 41 % des gesamten Energieverbrauchs und macht beim Batterie-AGV mit 5 % nur noch einen Bruchteil dessen aus.

Insgesamt zeigen sich aus Umweltsicht deutliche Vorteile für das batterieelektrische AGV-System: Lokale Emissionsfreiheit und über den Lebensweg in allen Szenarien deutliche Vorteile bei der Klimawirkung und Versauerung sowie keine relevanten Nachteile bei den Feinstaubemissionen. Zukünftig wird sich die Bilanz der B-AGV durch den Ausbau erneuerbarer Energie sogar tendenziell verbessern.

### 3.7.8 Literatur zu APG 7

- [BMU 2009] Memorandum Product Carbon Footprint: Positionen zur Erfassung und Kommunikation des Product Carbon Footprint für die internationale Standardisierung und Harmonisierung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Umweltbundesamt und Ökoinstitut e.V.. Berlin 2009.
- [Bundesregierung 2009] Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Berlin 2009.
- [DLR 2010] J. Nitsch, et al.: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. „Leitstudie 2010“. Arbeitsgemeinschaft DLR/IWES/IFNE. Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2010
- [Ecofys 2011] Bömer, J., Burges, K. und C. Nabe: Abschätzung der Bedeutung des Einspeisemanagements nach EEG 2009. Auswirkungen auf die Windenergieerzeugung im Jahr 2009. Ecofys. Kurzstudie im Auftrag des Bundesverband Windenergie e.V. (BWE). URL: [http://www.eeg-aktuell.de/wp-content/uploads/2011/04/BWE\\_Ecofys\\_Kurzstudie\\_zum\\_EinsMan\\_Januar\\_2011.pdf](http://www.eeg-aktuell.de/wp-content/uploads/2011/04/BWE_Ecofys_Kurzstudie_zum_EinsMan_Januar_2011.pdf)
- [Ecoinvent 2008] Ecoinvent Database Version 2.2. Ecoinvent Centre. Zürich 2008.
- [EEG 2011] Gesetz zur Neuregelung des Rechtsrahmens für die Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (EEG-Novelle 2012), Bundesgesetzblatt, August 2011
- [EnergieVision 2011] EnergieVision e.V.: Webseite mit Informationen zur Stromherkunft zertifizierter Ökostromprodukte. URL: <http://www.energie-vision.de>. Zugriff: 27. Oktober 2011
- [EU 1999] Richtlinie 1999/30/EG über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft. Europäische Union. Brüssel 1999.
- [EU 2005] Richtlinie 2004/26/EG zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte. Europäische Union. Brüssel 2005.
- [FZ Jülich 1994] Programmgruppe Technologieforschung. Bericht zum Teilprojekt 3. ‚Primärenergie‘ des Forschungsvorhabens ‚Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien (IKARUS)‘ (FKZ BMFT ET 9188A).

- [Garche 2008] Garche, J., Wohlfahrt-Mehrens, M. und W. Tillmetz: Forschung und Entwicklung für die nächste Generation von Lithium-Batterien. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW). Baden-Württemberg 2008
- [Geile 2011] Telephonische Auskunft des Batterieherstellers Hawker
- [Hedden & Jess 1994] Hedden, K. und Jess, A.: Bereich Raffinerien und Ölveredelung. Bericht zum Teilprojekt 4 ‚Umwandlungssektor‘ des Forschungsvorhabens ‚Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien (IKARUS)‘ (FKZ BMFT ET 9188A).
- [Helms et al. 2010] Helms, H., M. Pehnt, U. Lambrecht und A. Liebich: Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions. Tagungsband des 18. ‚International Symposium Transport and Air Pollution 2010‘. Zürich 2010.
- [IEA 2010] World Energy Outlook 2010. International Energy Agency. Paris 2010.
- [IIASA 2005] Baseline Scenarios for the Clean Air for Europe (CAFE) Programme. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) im Auftrag der DG Environment. Laxenburg 2005.
- [INFRAS 2009] Handbook emission factors for road transport (HBEFA) Version 3.1. Infrac. Bern 2010.
- [IPCC 2007] Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change. Genf 2007.
- [Klöpffer & Grahl 2009] Klöpffer W. und B. Grahl: Ökobilanz (LCA). Ein Leifaden für Ausbildung und Beruf. Wiley-Vch Verlag Weinheim 2009.
- [Maxwell 2011] Firma Maxwell Technologies Inc.: Vertrauliche Informationen zur Herstellung von Supercaps
- [McLennan 2011] McLennan, W.: Europe moves to ban imports of tar sands oil from Canada. Online-Artikel:  
[http://www.theecologist.org/News/news\\_analysis/829665/europe\\_moves\\_to\\_ban\\_imports\\_of\\_tar\\_sands\\_oil\\_from\\_canada.html](http://www.theecologist.org/News/news_analysis/829665/europe_moves_to_ban_imports_of_tar_sands_oil_from_canada.html). Stand Oktober 2011
- [MWV 2001] Mineralöl-Zahlen 2001. Mineralölwirtschaftsverband e.V.. Hamburg 2002.
- [Pehnt et al. 2011] Pehnt, M., H. Helms, U. Lambrecht, D. Dallinger, M. Wietschel, H. Heinrichs, R. Kohrs, J. Link, S. Trommer, T. Pollok und P. Behrens: Elektroautos in einer von erneuerbaren Energien geprägten Energiewirtschaft. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft. Vol. 35 (2011). Wiesbaden 2011.
- [PSI 2010] C. Bauer: Ökobilanz von Lithium-Ionen-Batterien. Analyse der Herstellung von Energiespeichern für den Einsatz in Batteriefahrzeugen. Villigen 2010.
- [Ruetschi 2004] P. Ruetschi: Aging mechanisms and service life of lead-acid batteries. Journal of Power Sources, 127 (2004) 33–44
- [Rydh 1999] C. J. Rydh: Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationary energy storage. Journal of Power Sources 80 (1999) 21–29
- [Schimpf 2010] Schimpf, H.: Ökobilanzierung neuer fossiler Kraftstoffpfade aus Ölsand- und Kohlevorkommen. Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU). Tübingen 2010.
- [TU Graz 2009] Hausberger, S., M. Rexeis, M. Zallinger und R. Luz: Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3. Graz 2009.

- 
- [VDI1997] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Richtlinie 4600. Kumulierter Energieaufwand: Begriffe Definitionen, Berechnungsmethoden. Juni 1997.
- [WHO 2011] World health organization (Europe) und JRC (European Comission): Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe. Bonn 2011

### 3.8 APG 8: Organisation und sonstige Begleitforschung

Für den Projektpartner GPT fiel bei der Durchführung des Projekts eine Vielzahl von innerbetrieblichen und externen organisatorischen Aufgaben an. Zu den innerbetrieblichen Aufgaben zählte die Koordination der technischen und kaufmännischen Fachabteilungen sowie der Fertigung. Aufgrund des kurzen Zeitraums, der für die Konstruktion und den Aufbau der beiden Batterie-AGV zur Verfügung stand, mussten teilweise standardisierte Arbeitsabläufe verkürzt werden, was einen zusätzlichen administrativen Aufwand darstellte. Auch die Auswahl eines geeigneten Lieferanten für die BWS, die anschließende Auftragsvergabe und die anschließende Abstimmung der technischen und kommunikativen Schnittstellen erforderte einen erheblichen personellen Aufwand. Dazu kamen koordinative Aufgaben für die Errichtung der BWS bei CTA und die Inbetriebnahme zusammen mit den Batterie-AGV. Des Weiteren musste der Transport der Fahrzeuge und der Batterien über die Versandabteilung von GPT und die anfallenden Dienstreisen für die Mitarbeiter von GPT organisiert werden.

Darüber hinaus war GPT als Konsortialführer des Projekts federführend an der Organisation der Projekttreffen und der Erstellung der Zwischen- und des Abschlussberichts beteiligt. Das Projekt wurde in mehreren Veröffentlichungen einem breiten Publikum vorgestellt, der Höhepunkt war die Ausstellung eines der Fahrzeuge auf der Terminal Operating Conference (TOC) in Antwerpen im Juni 2011.

Über die in der APG 3 angestellten Untersuchungen zu den umwelttechnischen Vorteilen durch ein gesteuertes Laden, wurden vom Projektpartner GPT keine weiteren Aufgaben im Sinne einer Begleitforschung wahrgenommen.

Die von CTA im Rahmen der APG 8 erbrachten Leistungen waren allesamt organisatorischer Art. Hierunter fielen insbesondere Projektleitungsaufgaben, die Erstellung von Projektplanungen, die Koordination von Fremdfirmen verschiedenster Gewerke auf dem Gelände des CTA während der umfangreichen Baumaßnahmen und die Sicherstellung des Informationsflusses in die betrieblichen Abteilung zwecks Integration des neuen Systems in den 24-h-Betrieb. Letzteres beinhaltet z.B. das Verfassen von Verfahrensanweisungen, Vorgaben für das Verhalten in Fehlerfällen. Zudem entfielen auf dieses AP die Aufwände für die Durchführung von zahlreichen Projektbesprechungen, z.T. mit den Verbundpartnern und dem Projektträger, sowie organisatorische Abklärungen mit dem Projektträger.

Mit technisch organisatorischen Tätigkeiten im AP 8 waren zudem die Ingenieure der Abteilung „Container Technik“ der HHLA-Container-Holding HHCT im Auftrage von CTA betraut. Auch diese haben koordinierende Aufgaben in Bezug auf die technischen Themen wahrgenommen, sowie auch an Projektbesprechungen teilgenommen.

Ferner war im Auftrage von CTA die Uniconsult, Universal Transport Consulting GmbH während der kompletten Projektlaufzeit mit der administratorischen Abwicklung betraut. Dazu gehörten sämtliche administratorischen Abklärungen mit dem Projektträger, das Projektcontrolling, das Vorbereiten und Versenden von Zwischenberichten und Zahlungsanforderungen.

Eine Begleitforschung hat seitens des Verbundpartners CTA nicht stattgefunden.

In der anschließenden Tabelle sind die während der Projektlaufzeit getätigten Veröffentlichungen zusammengestellt. Für die Zeit nach dem Projektabschluss sind bereits weitere Veröffentlichungen geplant.

**Tabelle 22:** Veröffentlichungen

Nr.	Projektpartner	Titel
1	GPT	„Demag Cranes entwickelt Anwendung des batterie-elektrischen Antriebs in einem Partnerkonsortium weiter“, Pressemitteilung vom 08.10.2010
2	GPT	„Emissionsfreier Schwerlasttransport im Hafen“, Beitrag auf dem Antriebstechnischen Kolloquium (ATK) am 29.03.2011 in Aachen
3	GPT	Messeauftritt mit Exponat auf der „Terminal Operating Conference (TOC)“ in Antwerpen, 06.-08.-06.2011
4	GPT	„Demag Cranes und HHLA starten regulären Flottenbetrieb mit batterie-betriebenen Containertransportfahrzeugen“, Pressemeldung vom 08.06.2011
5	GPT	Produktprospekt „Electric mobility provided by Gottwald“
6	GPT	Innovationsbroschüre „Making innovations work“
7	CTA	HHLA und Demag Cranes läuten eine neue Etappe der Elektromobilität ein, Pressemeldung vom 08.06.2011
8	CTA	Veröffentlichung eines Filmdokuments auf der Internet-Homepage der HHLA unter dem Link: <a href="http://hhla.de/Batterie-AGV.1672.0.html">http://hhla.de/Batterie-AGV.1672.0.html</a>

## **4 DARSTELLUNG WESENTLICHER ABWEICHUNGEN VOM ARBEITSPLAN**

Die in der Vorhabensbeschreibung dargestellten Arbeitspakete wurden ohne wesentliche Änderungen innerhalb der Projektlaufzeit durch die entsprechenden Projektpartner erfolgreich bearbeitet.

Eine Ausnahme bildet die geplante Installation des zusätzlichen Kurzzeitenergiespeichers in Form eines SuperCaps in einem der Batterie-AGV. Wie in der Darstellung der Ergebnisse bereits beschrieben, konnte mit Hilfe der vom ika durchgeführten Prüfstandsversuche und dem Simulationsmodell nachgewiesen werden, dass bereits mit der eingesetzten Bleibatterie allein ein hohes Maß an Rekuperation möglich ist. Diese Möglichkeit war vor den Untersuchungen so nicht bekannt. Aufgrund der positiven Ergebnisse mit der Bleibatterie und den geringen Erfolgsaussichten für eine merkliche Steigerung des Rekuperationsvermögens durch einen zusätzlichen SuperCap, wurden der AP 1.7 „Integration SuperCaps“ gekürzt und die AP 1.8 „Inbetriebnahme Fahrzeug mit SuperCaps“ und AP 4.5 „Feldversuch SuperCaps“ gestrichen. Die Änderung des Arbeitsplans wurde mit dem Projektträger abgestimmt und genehmigt.

## **5 VERGLEICH DER PROJEKTERGEBNISSE ZUM INTERNATIONALEN STAND DER TECHNIK**

Derzeit ist das Thema Elektromobilität weltweit Gegenstand intensiver Forschungsaktivitäten sowohl vor technischen als auch ökologischen Hintergründen. Aus technischer Sicht liegen die Schwerpunkte in der Erforschung und Verbesserung der Batterietechnologie und der Integration der Ladeprozesse in das vorhandene Stromnetz. Der Großteil der Forschungsaktivitäten bezieht sich auf den Bereich von Personen- und Nutzfahrzeugbereich im öffentlichen Straßenverkehr. Dagegen sind die elektrische Antriebstechnik und der Einsatz von Blei-Säure-Batterien bei Flurförderzeugen seit langem Stand der Technik.

Neuartig in diesem Projekt sind der Einsatz eines batterie-elektrischen Antriebs in dieser Größenordnung und Leistungsklasse von Fahrzeugen, die deutlich höhere Batteriespannung sowie der vollautomatisierte Batteriewechsel- und Ladevorgang. Innerhalb des Projekts konnte gezeigt werden, dass mit dem vorhandenen System bereits heute ein Container-Terminal mit batterie-elektrischen Containertransportern betrieben werden kann. Das Produkt „Batterie-AGV“ wurde offiziell in die Produktpalette von GPT aufgenommen und über den Projektpartner CTA hinaus bereits anderen Kunden vor Ort erfolgreich präsentiert.

Die eingehende Verfolgung der Fachpresse zeigt, dass einige Unternehmen aus dem Bereich von Schwerlasttransportfahrzeugen an umweltfreundlichen Antriebslösungen für ihre Produkte arbeiten. Ein Großteil der Aktivitäten entfällt dabei auf die Entwicklung von hybriden Antriebssträngen, rein elektrische Lösungen sind nur aus Studien oder Konzepten bekannt und von einer eventuellen Markteinführung weit entfernt. Die Konzepte beruhen auf fest eingebauten Batterien, manuelle oder automatisierte Batteriewechselvorgänge sind nicht bekannt.

## 6 ZUKUNFSTAUSSICHTEN UND WEITERER F&E-BEDARF

Die beiden Batterie-AGV fahren seit Anlieferung bei CTA im permanenten 24h/7d-Flottenbetrieb nahezu fehlerfrei mit. Die betriebliche Integrationsfähigkeit, eine unauffällige (möglichst keine technischen Fehlersituationen) und logistisch performante Funktionsweise dieses batteriebetriebenen Flurförderzeugsystems sind neben wirtschaftlichen Gesichtspunkten die wesentlichen Voraussetzungen um einen generellen Systemwechsel vom dieselbetriebenen zum batteriebetriebenen Flurförderzeugsystem (Ersatzinvestitionen) anzugehen.

Um eine solch richtungsweisende Entscheidung im Hinblick auf einen Systemwechsel zu treffen, reicht aus Anwendersicht der zurückliegende Testzeitraum jedoch noch nicht aus.

Einerseits gilt es, über einen längeren Zeitraum hinweg die bisher gewonnenen Eindrücke zum elektrischen Verbrauchverhalten der Fahrzeuge zu festigen um eine fundierte Basis für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zu erhalten. Andererseits zeigt sich die notwendige Allwetter-Robustheit eines Containertransportsystems erfahrungsgemäß erst bei längerem Gebrauch (Gefahr sogenannter „Kinderkrankheiten“). Als Beispiele seien hier erwähnt, dass der bisherige Probetrieb in der warmen und zumeist trockenen Jahreszeit durchgeführt wurde. Das Verhalten der neuen Technik im Hinblick auf die kalte Jahreszeit mit Minustemperaturen (z.B. bzgl. Batteriekapazität) ist noch zu untersuchen. Die bisherige Anzahl der Batteriewechselspiele zeigt keinerlei Beeinträchtigungen an den neu entwickelten Kontaktplatten zwischen dem Fahrzeug und der Traktionsbatterie. Wie aber sehen der Verschleiß und/oder die Verschmutzung an den Kontaktplatten nach vielen hundert Batteriewechselspielen aus?

Dies sind nur zwei exemplarische Beispiele für viele Fragen, die auf dem Wege zur Bewertung einer Allwettertauglichkeit der neu entwickelten Techniken noch zu beantworten sind.

Auf Grund der bisher gemachten, betrieblichen Erfahrungen wird seitens der Verbundpartner CTA und GPT davon ausgegangen, dass die Batterie- und Wechseltechnik prinzipiell geeignet ist, diese Anforderungen zu erfüllen. Gemeinsam haben sich GPT und CTA daher darauf verständigt, im Anschluss an das Förderprojekt den Probetrieb um mindestens ein halbes Jahr zu verlängern. Dadurch sollen viele der noch offenen Fragen aus der Praxis und der Sicht des Anwenders bewertet und beantwortet werden können.

Für die Integration weiterer Batterie-AGV bei CTA oder für die Planung eines neuen, komplett mit Batterie-AGV betriebenen Terminals sind seitens GPT weitergehende logistische Untersuchungen erforderlich. Die Auswirkung der Anfahrten der BWS und die Verteilung der einzelnen Wechselvorgänge muss hierfür im Detail untersucht werden. Es müssen geeignete Strategien entwickelt und in der AGV-Managementsoftware implementiert werden, die eine intelligente Anfahrstrategie der BWS erlauben. Dies könnten beispielsweise vorgezogene Batteriewechsel sein, so dass bei einer anschließenden „peak-Situation“ keine Verzögerungen an der BWS durch zu viele Fahrzeuge entstehen.

Für GPT als Systemlieferanten ist die Entwicklung eines geeigneten Batterieverwaltungssystems bzw. -monitoringsystems von großer Bedeutung. Da zwischen den Fahrzeugen und den Batterien keine feste Zuordnung vorliegt, muss eine eigene Datenbank aufgebaut werden, in der Informationen über die Betriebsdaten der einzelnen Wechselbatterien gespeichert werden. Hierzu zählen die Anzahl der bisherigen Ladezyklen, die durchgesetzte Kapazität sowie bereits durchgeführte und geplante Wartungsarbeiten. Die zu entwickelnde Software muss anschließend so implementiert werden, dass sie in die Kommunikationsstruktur des gesamten Terminals eingebunden werden kann.

Für den Ausbau der Batterielade- und Wechselstation müssen Konzepte entwickelt werden, die erforderliche Wartungs- und eventuelle Reparaturarbeiten an den Batterien und am Regalbediengerät ermöglichen, ohne den regulären Betrieb merklich einzuschränken. Als Beispiel sei hier die Planung von geeigneten Batteriewartungsplätzen genannt, die auch sicherheitstechnisch in den Automatikbetrieb eingebunden werden müssen.

Um die ökologischen und wirtschaftlichen Vorteile des batterie-elektrischen Systems noch weiter ausnutzen zu können, ist die Erforschung und Entwicklung geeigneter Ladestrategien und die Einbindung der Batterieladestation in das Stromnetz von großer Bedeutung. Unter dem Stichwort „smart grid“ sollen zukünftig die Ladevorgänge so angesetzt werden, dass ein Höchstmaß der Energie aus den fluktuierenden, erneuerbaren Energiequellen genutzt werden kann. Hierfür wurde der Grundstein bereits in diesem Projekt mit dem AP 3 „Gesteuertes Laden“ gelegt. Aufgrund der immensen Komplexität dieser Aufgabe besteht jedoch noch ein großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf, bis die gefundenen Ansätze in der Praxis umgesetzt werden können.

Die eingesetzten Blei-Säure-Batterien sind sehr gut für den Einsatz geeignet, wie in dem durchgeführten Feldversuch gezeigt werden konnte. Der Ausblick auf den Einsatz einer Li-Ion-Batterie im AP 6 macht deutlich, dass durch einen zukünftigen Einsatz dieser Technologie jedoch noch weitere Energieeinsparungen bzw. eine Verminderung des Ausstoßes von klimaschädlichen Treibhausgasen bei der Energieerzeugung möglich sind. Für den Projektpartner GPT als Fahrzeughersteller ist daher die Erforschung dieser Technologie sehr interessant, insbesondere die praktische Erprobung einer Li-Ion-Batterie unter realen Bedingungen. Aufgrund der hohen Kosten für eine Prototypenbatterie auf Basis der Li-Ion-Technologie sind momentan hierzu bei GPT keine Entwicklungsaktivitäten geplant.

## 7 BEITRAG ZU DEN FÖRDERPOLITISCHEN ZIELEN DES BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU)

**Tabelle 23:** Bezug zu förderpolitischen Zielen

Förderpolitische Ziele	Bezug im Vorhaben
Nutzung von Energieeffizienzvorteilen durch Einsatz von Elektrofahrzeugen	Etablierung von batterie-elektrischen AGV als Ersatz für diesel-elektrisch und diesel-hydraulisch angetriebene AGV.  Erhebliche Steigerung des Gesamtwirkungsgrads der Containertransporter auf mehr als das Doppelte.
Reduktion lokaler Emissionen (Schadstoffe, Lärm)	Die lokalen Umweltbelastungen (Lärm, Abgase) im Hafen werden erheblich reduziert: Vollständige Reduktion der Schadstoffemission und weitestgehende Lärmreduktion bei den AGV.
Verbesserung der Umwelt- und Lebensqualität in Ballungsräumen	Projekt wird im Hafengebiet des Ballungsraums Hamburg durchgeführt, hier kann eine unmittelbare Entlastung erreicht werden.  Bei erfolgreicher Erprobung können alle Ballungsräume mit Logistikumschlag entlastet werden, hier bietet sich ein großer Multiplikatoreffekt an.
Reduktion von klimaschädlichen Emissionen	Die CO <sub>2</sub> -Emissionen der Containertransporter können unter Betrachtung der gesamten Energiekette deutlich reduziert werden (mind. 30%).
Erprobung batterie-elektrischer Fahrzeuge im Wirtschaftsverkehr	Die batterie-elektrischen Fahrzeuge werden in einem realen Umfeld und unter realen Betriebsbedingungen dauerhaft erprobt.
Ladestrategien und Integration fluktuierender Energiequellen	Der Batteriewechsel entkoppelt den Ladevorgang und den durchgängigen Fahrzeugbetrieb und erlaubt daher flexible Ladestrategien.  Ausschließliche Verwendung von Strom aus regenerativen Energiequellen.
Verstärkter Einsatz erneuerbarer Energien	Grundsätzliche Möglichkeit durch ausschließliche Nutzung von Elektrizität als Energiequelle im Projekt gegeben.