



**Der O-Bus  
als intelligente und nachhaltige Lösung  
für Europa**

Arbeitsergebnisse der Barnimer Busgesellschaft mbH  
aus dem EU-Projekt

"Trolley - Promoting Electric Public Transport"



# Trolley - Promoting *Electric* Public Transport

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>TROLLEY - Promoting electric public transport</b> .....	4
<b>TEIL A</b>	
<b>Untersuchung von Verkehrsgebieten hinsichtlich der möglichen Erweiterung von O-Bus-Netzen</b> .....	8
<b>TEIL B</b>	
<b>(I) Stationäre Energiespeichersysteme in Fahrleitungsnetzen von Nahverkehrsbahnen und O-Bussen</b> .....	34
<b>(II) Untersuchung über die Auswahl und den Einsatz eines Energiespeichers im Fahrleitungsnetz von O-Bussen (MAN NGE 152)</b> .....	50
<b>(III) Ergänzende Untersuchung über die Auswahl und den Einsatz eines Energiespeichers im Fahrleitungsnetz von O-Bussen (Solaris Trollino 18)</b> .....	74
<b>(IV) Europas erster Oberleitungshybridbus</b> .....	92
<b>TEIL C</b>	
<b>Marketing-Aktivitäten</b> .....	100

# TROLLEY - PROMOTING *ELECTRIC* PUBLIC TRANSPORT

## Was ist TROLLEY?

Das EU-Projekt "TROLLEY - Promoting electric public transport" (kurz: TROLLEY) fördert O-Busse auf internationaler Ebene als gebrauchsfertige elektrisch angetriebene Verkehrslösung für alle Städte.

Mit seinem integrierten Ansatz verfolgt das Projekt vor allem ein Ziel: **Die Förderung von O-Bussen als sauberste und ökonomischste Verkehrsalternative für nachhaltige Städte und Regionen in Mitteleuropa.** Denn O-Busse sind effizient, nachhaltig, sicher, und – wenn man externe Kosten berücksichtigt – dazu noch viel konkurrenzfähiger als Straßenbahnen oder Dieselbusse.

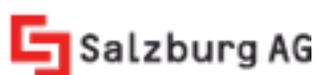
Dieses Projekt wird durch das INTERREG IVB CENTRAL EUROPE Programm (Mitteleuropa) gefördert. Das EU-Projekt TROLLEY reagiert direkt auf die Tatsache, dass Staus und Klimawechsel Hand in Hand mit steigenden Kosten gehen und dass Luft- und Lärmemissionen steigende Gesundheitskosten verursachen werden.

TROLLEY reagiert auf wachsende Abhängigkeit vom Öl und steigende Ölpreise und versucht, die Lebensqualität der Bürger zu verbessern. Außerdem trägt das Projekt zu besserer Erreichbarkeit in Städten Mitteleuropas bei – mit einem Schwerpunkt auf städtischem Verkehr.

Mit seinem integrativen Ansatz verfolgt das Projekt vor allem ein Ziel: Die Förderung von O-Bussen als sauberster und ökonomischster Verkehrsalternative für nachhaltige Städte und Regionen in Mitteleuropa. Mit diesem Hauptziel will TROLLEY Qualität, Sicherheit und Attraktivität des öffentlichen Nahverkehrs verbessern und gleichzeitig die negativen Umwelteinflüsse des Verkehrs in Mitteleuropa abschwächen.

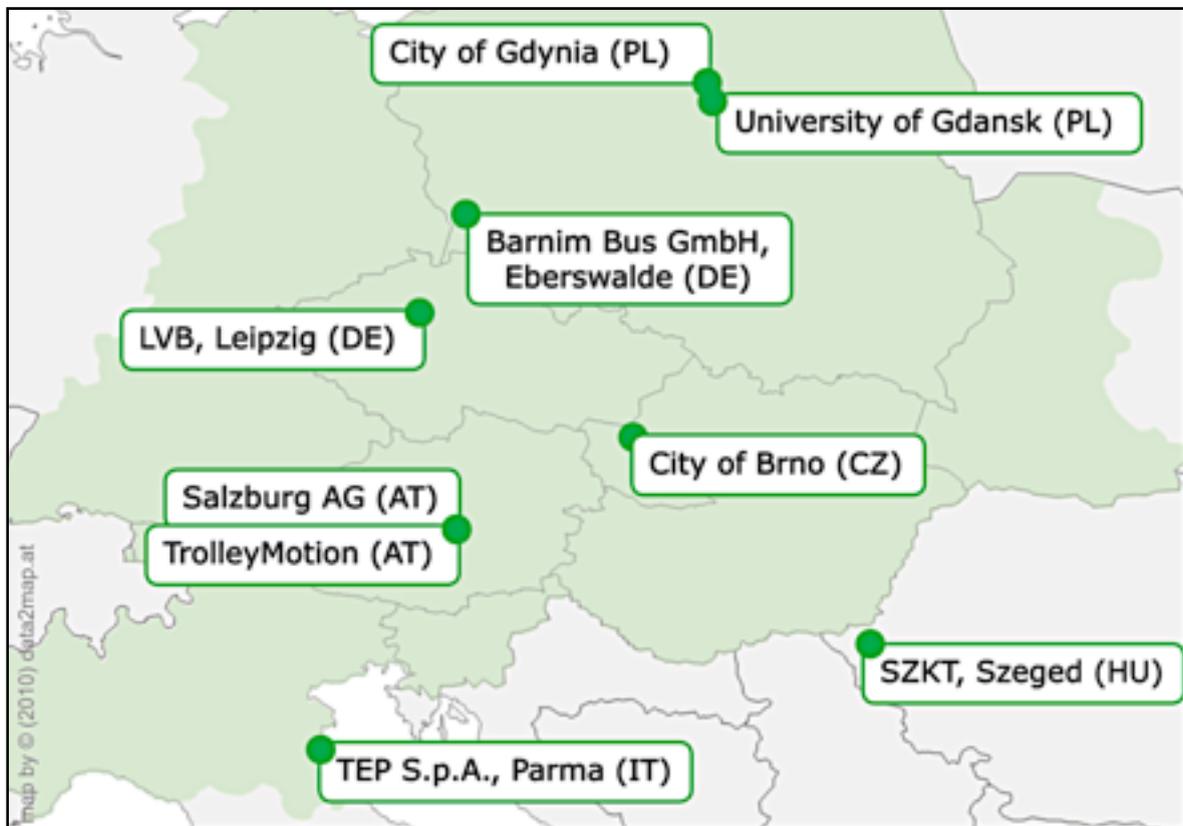
## Wer steckt hinter TROLLEY?

Das TROLLEY Konsortium besteht aus neun europäischen Stakeholdern im elektrischen ÖPNV aus insgesamt sechs Ländern:



### **Salzburg AG** (Österreich):

Der Hauptpartner Salzburg AG wird in Europa als die führende O-Busstadt wahrgenommen. Durch den Einsatz von Wasserkraft ist der O-Bus in Salzburg ein emissionsfreies System.



**Brno** (Tschechische Republik):

Brno hat die zweitmeisten O-Buslinien in Europa (nach Bratislava) und ist außerdem eine Stadt mit einem umfangreichen Straßenbahnsystem.



**Barnimer Busgesellschaft**, Eberswalde (Deutschland):

Die Barnimer Busgesellschaft mbH betreibt das älteste O-Bussystem in Deutschland. Die Nutzung der Bremsenergie ist hier schon seit 1983 Standard.



**TEP S.p.A.**, Parma (Italien):

TEP S.p.A ist der O-Busbetreiber der italienischen Stadt Parma, in der die O-Busse kontinuierlich seit 1953 fahren. TEP ist stolz darauf, (zusammen mit Mailand und Neapel) das O-Bussystem mit den meisten Linien in Italien zu betreiben.



**Leipziger Verkehrsbetriebe**, Leipzig (Deutschland):

Mit dem Nahverkehrsbetreiber der Stadt Leipzig hat das Projekt auch einen Partner, der in nächster Zukunft O-Busse wieder auf bestimmten Linien einführen will. Leipzig wird (nach Städten wie Rom) eine Modellstadt für viele andere europäische Städte sein.



**Gdynia (Polen):**

Gdynia hat das größte O-Busnetz in Polen, das auch die Nachbarstadt Sopot anbindet. Gdynia ist ein Experte bei der Umwandlung von alten Dieselnissen in moderne O-Busse.



**Universität von Gdansk (Polen):**

Die polnische Universität von Gdansk hat einen europäischen Ruf als Wissensstandort und Innovationsbrutkasten in Punkto öffentlicher Nahverkehr.



**SZKT, Szeged (Ungarn):**

SZKT, der Nahverkehrsbetreiber in Szeged, ist verantwortlich für die örtlichen Straßenbahn- und O-Bussysteme. Dieser Partner kennt sich besonders gut mit kombinierten Straßenbahn-O-Bus-Systemen aus und baut seine kontinuierlich aus.



**Trolley:Motion:**

Die internationale Aktionsgruppe TrolleyMotion ist der führende O-Bus Interessenverband. Sie ist Teil eines weit angelegten O-Busnetzwerks und pflegt gut eingeführte Kontakte zu allen relevanten O-Bus-Akteuren wie Städten, Industrie, Betreibern und Netzwerken.

## Eckdaten zum Projekt

<b>Programm:</b>	INTERREG IVB CENTRAL EUROPE Programm (Mitteleuropa)
<b>Priorität:</b>	Priorität 2, Verbesserung der Erreichbarkeit von und innerhalb Mitteleuropa(s)
<b>Anzahl der Partner:</b>	9
<b>Hauptpartner:</b>	Salzburg AG, Österreich
<b>ERDF Fördermittel:</b>	~ 3,3 Millionen Euro
<b>Gesamtkosten:</b>	~ 4,2 Millionen Euro
<b>Projektstart:</b>	01.02.2010
<b>Projektende:</b>	31.03.2013
<b>Sonstiges:</b>	Größtes Projekt im zweiten Projektauftrag in Bezug auf das Budget



## Arbeitsergebnisse der Projektgruppe

Die TROLLEY-Gruppe wird verschiedene Leitfäden und Arbeitsdokumente (die aus mehreren Unterprodukten bestehen) erarbeiten und diese anschließend veröffentlichen. Jeder Partner wird eigene Untersuchungen erheben und mit den Ergebnisse zu einem breiten Fundus beitragen.

Diese Dokumente bieten den aktuellen Wissensstand zum Betreiben von O-Bussen und können Entscheidungsträgern den entscheidenden Impuls zur Einführung eines O-Bussystems in ihrer Stadt oder Region geben.

Die Dokumente finden Sie unter anderem im Internet unter **[www.trolley-project.eu](http://www.trolley-project.eu)**.

Alternativ gelangen Sie über den QR-Code direkt auf dieser Internetseite.





# **TEIL B (I)**

## **Stationäre Energiespeicher- systeme in Fahrleitungsnetzen von Nahverkehrsbahnen und O-Bussen**



IVI

Im Auftrag der Barnimer Busgesellschaft mbH erarbeitet durch:

**Fraunhofer-Institut  
für Verkehrs- und Infrastruktursysteme  
Zeunerstraße 38  
D - 01069 Dresden**

## 1. Einleitung und Hintergrund

Die Rückgewinnung kinetischer bzw. potenzieller Energie setzt neben der Rückspeisefähigkeit der Traktionsausrüstung (z. B. generatorischer Betrieb der Fahrmotoren) das Vorhandensein eines Verbrauchers im Speiseabschnitt bzw. die Rückspeisefähigkeit des Fahrstromversorgungssystems in das übergeordnete Stromnetz voraus. Insbesondere auf Speiseabschnitten mit wenigen gleichzeitig im Betrieb befindlichen Fahrzeugen wird die erste Bedingung nur unzureichend erfüllt.

Auf Fahrzeugen mitgeführte bzw. stationäre Elektroenergiespeicher können diesen Mangel ausgleichen, indem sie im Betriebsmodus „Energiesparen“ nicht durch Verbraucher abzunehmende elektrische Rekuperationsenergie speichern und später wieder abgeben.

Die Barnimer Busgesellschaft mbH plant im Fahrleitungsnetz der Stadt Eberswalde einen stationären Elektroenergiespeicher zu installieren, um die Rekuperationsrate von kinetischer und potenzieller Energie beim Abbremsen ihrer O-Busse zu verbessern. Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick über derzeit kommerziell verfügbare Speichersysteme. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf deren Einsetzbarkeit als stationäre Elektroenergiespeicher in Fahrleitungsnetzen.

## 2. Überblick der Speichertechnologien

Nach der Art der Energiespeicherung werden mechanische, chemische, elektrochemische, elektrostatische, thermische und thermochemische Speicher unterschieden. In der nachfolgenden Tabelle sind gängige Beispiele für derartige Anwendungen dargestellt.

Die Einsatzgebiete der Speichertechniken unterscheiden sich nach dem Speichervermögen, der Speicherdauer und der Leistung die aufgenommen oder abgegeben werden kann. Die nachfolgende Darstellung gibt einen Überblick über das Leistungs- und Entladeverhalten der Gesamtsysteme. Diese reichen von einzelnen Speichereinheiten bis zu großen zusammenschalteten Anlagensystemen.

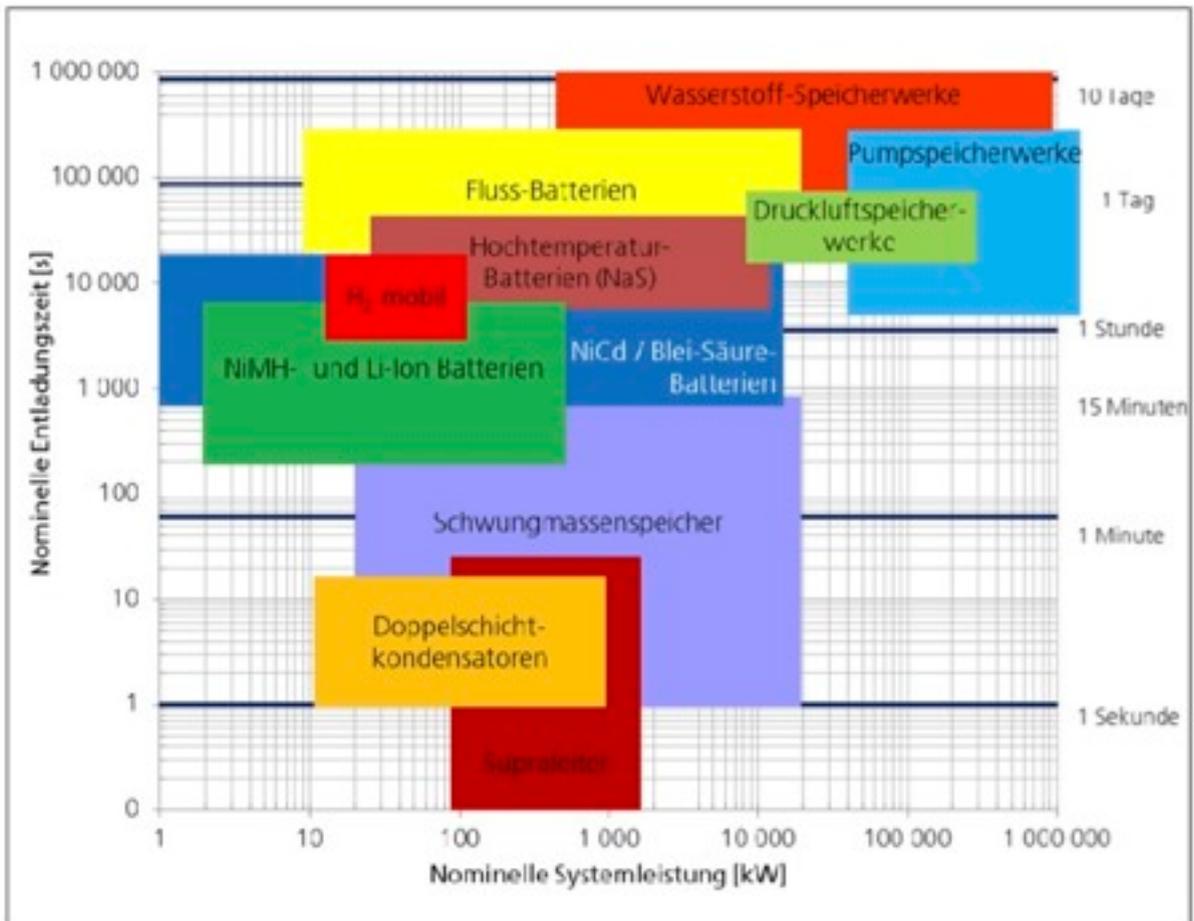
Art der Speicherung	Anwendung
<b>mechanisch</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pumpspeicherwerk</li><li>• Druckluftspeicher</li><li>• Schwungmassenspeicher</li></ul>
<b>chemisch</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Wasserstoff, Methan (durch Elektrolyse und ggf. nachfolgende Methanisierung)</li></ul>
<b>elektrochemisch</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Batterien (z. B. Blei-Säure, NiCd, NiMH, Li-Ion oder Redox-Fluss-Batterien, Hochtemperatur-Batterien usw.)</li></ul>
<b>elektrostatisch</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kondensatoren, speziell Doppelschichtkondensatoren</li><li>• supraleitende magnetische Energiespeicher</li></ul>
<b>thermisch</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Wärmespeicher (Wasser, Feststoffspeicher)</li></ul>
<b>thermochemisch</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Latentwärmespeicher (Systeme mit Phasenübergang z. B. zwischen fest und flüssig)</li></ul>

Teil B (I), Tabelle 1: Anwendungen für verschiedene Arten der Energiespeicherung

In Fahrleitungsnetzen von Nahverkehrssystemen eröffnen sich zwei Anwendungsgebiete für Energiespeicher

- die Stabilisierung der Netzspannung und
- die kurzzeitige Zwischenspeicherung von Bremsenergie zur Einsparung von Traktionsenergie.

Zur Spannungsstabilisierung werden die Speicher ständig auf einem hohen Ladeniveau gehalten.



Teil B (I), Abb. 1: Einsatzbereiche verschiedener Speichertechnologien, klassifiziert nach Leistung und nomineller Entladungszeit Quelle: [Hannig 2009], S.24, eigene Darstellung

Beim Absinken der Netzspannung unter einen festgelegten Wert wird aus dem Speicher Energie zur Spannungsstützung ins Netz eingespeist. Im Betriebsmodus Energiesparen werden die Speicher auf einem solchen Ladeniveau betrieben, dass die Rekuperationsenergie von bremsenden Fahrzeugen stets aufgenommen und für spätere Anfahrvorgänge wieder ins Netz eingespeist werden kann.

Aus diesen Aufgaben und der notwendigen Aufstellung im öffentlich zugänglichen Raum ergeben sich die grundsätzlichen Anforderungen an die Speichersysteme. Diese müssen

- die Aufnahme und das Rückspeisen von hohen Leistungen erlauben,
- einen hohen Ein-/Auspeicherwirkungsgrad besitzen,
- möglichst geringe Speicherverluste aufweisen,
- über eine hohe Systemzuverlässigkeit verfügen,

- eine hohe Anzahl von kurzfristigen Lade-/Entladezyklen zulassen,
- eine kompakte Bauweise mit geringem Platzbedarf aufweisen,
- relativ geringe Systemkosten verursachen und
- mit ihnen dürfen keine unzulässigen Gefährdungen der Umgebung und der Umwelt verbunden sein.

Damit schränkt sich die oben aufgezeigte Vielfalt der Speichermedien ein. Großanlagen wie Pump- und Druckluftspeicherwerke sind sowohl wegen ihrer Größe und Ortsgebundenheit als auch ihrer im Tagesverlauf beschränkten Zyklenzahl nicht geeignet. Die chemische Zwischenspeicherung in Form von Wasserstoff bzw. Methan ist mit großen Wirkungsgradverlusten verbunden und genügt auch den zeitlichen Anforderungen nicht. Thermische und thermochemische Speicher sind aufgrund der zusätzlich erforderlichen Anlagen zur Rückverstromung ebenfalls nicht geeignet und supraleitende magnetische Spulen sind wegen der hohen Kosten sowie der noch im Forschungsstadium befindlichen Technik auf Nischenanwendungen beschränkt.

Für die stationäre Energiespeicherung in Stromversorgungsanlagen von Nahverkehrssystemen kommen damit nur Schwungmassensysteme, Kondensatoranwendungen und Batteriespeicher in Betracht. Diese Speichertechnologien werden nachfolgend näher vorgestellt und ihre Anwendbarkeit für die Stromversorgungsnetze von Nahverkehrssystemen dargestellt. Eine vergleichende Übersicht über ausgewählte Speichersysteme befindet sich im Anhang. Absichtlich wurden dort Angaben aus mehreren Quellen zitiert, um die Variationsbreite der Kennwerte und auch Entwicklungstendenzen kenntlich zu machen. Insbesondere sind bei neueren Technologien zum Teil erhebliche Steigerungen in Leistung und Energieinhalt und nennenswerte Kostensenkungen zu erwarten.

## I. Batteriespeicher

Allgemein werden als Batterien sowohl Primärbatterien als auch Akkumulatoren (Sekundärbatterien) bezeichnet. Nur Akkumulatoren besitzen die Eigenschaft Energie mehrfach aufnehmen und abgeben zu können und sind damit für den Einsatz als Energiezwischenpeicher geeignet. Die Batterietypen unterscheiden sich nach den verwendeten Materialien, deren räumlicher Anordnung sowie der Betriebstemperatur. Im Allgemeinen kommen Niedrigtemperaturbatterien zum Einsatz. Beispiele dafür sind Blei-Säure- (Pb), Nickel-Metallhydrid- (NiMH) und Nickel-Cadmium-Batterien (NiCd) sowie Lithium-Batterien in unterschiedlichen Materialkombinationen, darunter die Lithium-Ionen-Akkus (Li-Ion) für die das höchste Entwicklungspotential erwartet wird.

Bekannte Hochtemperaturbatterien sind Natrium-Schwefel (NaS) und Natrium-Nickelchlorid-Batterien (NaNiCl), welche auch als Zebra-Batterien bezeichnet werden. Eine Besonderheit bilden die Redox-Fluss-Batterien, auch oft engl. als Redox-Flow-Battery bezeichnet, bei denen die Batterie keine bauliche Einheit bildet, sondern in Leistungseinheit und Speicher für die Reaktanten getrennt ist. In den folgenden Unterpunkten werden die hier genannten Batterietypen näher beschrieben, wobei auf Hochtemperatur- und Redox-Fluss-Batterien zusammenfassend eingegangen wird.

### a) Hochtemperaturbatterien

Hochtemperaturbatterien arbeiten bei einer Temperatur zwischen 270 und 350 °C. NaS-Batterien werden mit flüssigem Natrium und Schwefel betrieben. Sie sind kommerziell verfügbar und werden als stationäre Anlagen eingesetzt. Anwendungen sind fast ausschließlich in Japan zu finden. Einziger Hersteller ist NKG Insulators Ltd. Japan. Die Angaben in der Literatur hinsichtlich der Erhaltung der notwendigen Pro-

zesswärme unterscheiden sich. So soll nach [Wietschel 2010] bei täglichen Ein-/Ausspeichervorgängen und guter Wärmedämmung die notwendige Betriebstemperatur durch die batterieinternen Reaktionen ohne zusätzliche Wärmezufuhr erhalten werden können.

In [Hannig 2009] wird auf die Notwendigkeit einer zusätzlichen Heizung im standby-Betrieb hingewiesen, die zu Verlusten von 14 bis 18 Prozent pro Tag führen kann. Die kalendarische Lebensdauer wird mit 6 bis 15 Jahren angegeben, der Wirkungsgrad unter günstigen Bedingungen mit 70 bis 80 Prozent. Leistung und Energieinhalt derartiger Anlagen erreichen den MW- und MWh-Bereich. Als Beispiel ist die Großbatterieanlage (6 MW, 48 MWh) der Tokyo Electric Power Company in Tsunashima zu nennen. Für den Einsatz als Speicher für Fahrleitungsanlagen erscheinen sie durch die Verwendung von flüssigem Natrium und Schwefel aufgrund der damit verbundenen Umweltgefahren wenig geeignet. Zebra-Batterien (NaNiCl) arbeiten bei ähnlichen Temperaturen, ebenfalls mit flüssigem Natrium und sind nach außen wärmedicht gekapselt. Auch bei diesen Speichern ist für den Ruhebetrieb eine zusätzliche Heizung notwendig. Die dadurch auftretenden Verluste liegen bei ca. 10 % täglich.

Zebra-Batterien werden von der Schweizer Firma FZ SONICK S.A. (ehemals MES-DEA) in kleinen Stückzahlen hergestellt und finden in Elektrofahrzeugen Anwendung (z. B. Twingo-Elektra, dem Transporter IVECO Daily electric, dem im Stadtverkehr von Lyon mit fünf Fahrzeugen verkehrenden IVECO Irisbus Europolis oder dem Solarbus Tindo in Adelaide). Weiterhin werden sie in Rettungs-Unterseebooten von Rolls Royce angewendet. Als stationäres System wurde in Kanada eine 100 kWh Pilotanlage errichtet. Zusammenschaltungen derartiger Anlagen bis in den MW-Bereich seien möglich, jedoch sind größere stationäre Anwendungen nicht bekannt. Als kalendarische Lebensdauer werden 8 bis 10 Jahre angegeben. Für die Nutzung als Speicher in Fahrleitungsanlagen sind sie durch die geringe Zyklenzahl von ca. 1500 [Hannig 2009] weniger geeignet.

## **b) Blei-Säure-Batterien**

Blei-Säure-Batterien (Pb) sind wohl die allgemein am meisten bekannten. Die Technologie ist ausgereift, kommerziell verfügbar, relativ preisgünstig und wird von verschiedenen Herstellern angeboten. Die Batterien bedürfen eines vergleichsweise hohen Wartungsaufwands, der mit zunehmendem Alter der Systeme steigt. Als kalendarische Lebensdauer für Industriebatterien werden 5 bis 15 Jahre angegeben. Aufgrund der beschränkten Zyklenzahl wird sich die Nutzungsdauer beim Einsatz in Fahrleitungsanlagen mit häufigen Ein- und Ausspeichervorgängen erheblich reduzieren, wenn das Speichersystem nicht überdimensioniert wird, um tiefere Entladungen zu vermeiden.

Das Einsatzgebiet der Blei-Säure-Batterien reicht vom Automotive-Bereich bis hin zu Großanwendungen in Energieversorgungsnetzen. So betrieb beispielsweise die BEWAG im ehemaligen Westberliner Netz eine derartige Großanlage zur Frequenz- und Spannungsstabilisierung mit 17 MW und 14 MWh [VDE 2009]. Die Stadtwerke Herne setzen seit 1997 eine derartige Anlage von 1,2 MW und 1,2 MWh als Zwischenspeicher für einen Solarpark ein. Mit der erreichbaren Leistung und Kapazität erscheinen Anwendungen zur Netzstabilisierung und Speicherung von Rekuperationsenergie in Fahrleitungssystemen prinzipiell geeignet. Jedoch steht dem die geringe Zyklenzahl entgegen, so dass keine Anwendungen in diesem Bereich bei der Recherche gefunden werden konnten.

### c) Nickel-Cadmium-Batterien

Nickel-Cadmium-Batterien (NiCd) basieren auf einer ausgereiften Technologie, die seit rund 100 Jahren bekannt ist. Sie haben ein weites kommerzielles Einsatzfeld. Es erstreckt sich prinzipiell von Kleinanwendungen im Privatbereich über kleine und mittlere industrielle Anwendungen bis hin zu großen stationären Speichersystemen in Energieverteilungsnetzen (z. B. Speicherwerk der Golden Valley Energy Authority in Fairbanks, Alaska mit einer Leistungsfähigkeit von 40 MW über 7 Minuten bzw. 26 MW über 15 Minuten [DTI 2004]). In Europa werden sie vorrangig von den Firmen Hoppecke und Saft angeboten. Aufgrund der Giftigkeit von Cadmium sind in Europa Vertrieb und Nutzung von NiCd-Batterien stark eingeschränkt. Das deutsche Batteriegesetz erlaubt in Umsetzung europäischer Richtlinien Batterien mit einem Cadmiumanteil von mehr als 0,002 Gewichtsprozenten ausschließlich nur für die Verwendung als Gerätebatterien in Not- und Alarmsystemen, schnurlosen Elektrowerkzeugen und Altfahrzeugen, die unter Anhang II der Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates fallen.

Für Industrieanwendungen sind entsprechend strenge Sicherheitsvorschriften zu beachten. Als Vorteil ist die Speicherfähigkeit auch bei tiefen Temperaturen (-20 bis -40 °C) zu betrachten. Nachteile der Technologie bestehen im relativ starken Memoryeffekt, dem etwas geringeren Wirkungsgrad und den relativ hohen Kosten. Der Wartungsaufwand soll geringer sein als bei Blei-Säure-Batterien [Price 2005]. Die Zyklenfestigkeit ist mit ca. 2000 Zyklen knapp doppelt so hoch, jedoch nicht ausreichend für ÖPNV-Anwendungen.

### d) Nickel-Metallhydrid-Batterien

Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH) stellen praktisch die Nachfolgetechnologie der NiCd-Batterien dar, mit dem Vorteil der Vermeidung von Cadmium. Der Anwendungsrahmen erstreckt sich vom Verbraucherbereich bis zu Traktionsanwendungen vor allem in Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Im Gegensatz zu NiCd-Batterien sind Zyklen- und Temperaturfestigkeit sowie die kalendarische Lebensdauer geringer. Energiegroßspeicher mit NiMH-Batterien sind nicht bekannt. Der Einsatz in Fahrleitungsnetzen ist damit auch kaum wahrscheinlich.

### e) Lithium-Ionen-Batterien

Unter dem Begriff Li-Ion-Batterien wird eine große Anzahl von Kombinationen aus verschiedenen Elektrolyten und Elektrodenmaterialien zusammengefasst. Die Forschungen und Entwicklungen der letzten Dekaden führten zu einer wesentlichen Verbesserung von Leistung, Energieinhalt sowie der Brand- und Explosionssicherheit. (Lithium reagiert in exothermer Reaktion äußerst heftig mit Wasser aber auch mit Luft und Stickstoff). Im Vergleich zu anderen Batteriesystemen verfügen sie über eine sehr hohe Energie- und Leistungsdichte, einen hohen Wirkungsgrad und eine erhöhte Zyklenfestigkeit. Allerdings ist für ihren Betrieb stets ein Batteriemanagementsystem mit Einzelzellenüberwachung und Ladungsausgleich notwendig, um das Betriebsspannungsfenster für jede Einzelzelle einzuhalten.

Li-Ion-Batterien sind vorrangig als portable Anwendungen für Kommunikationselektronik bekannt, mit Leistungen und Kapazitäten im Bereich von einigen Wh. Große Bedeutung gewinnt die Technologie aktuell für den Antrieb von Elektro- und Hybridfahrzeugen bei einer Erweiterung auf den kW- und kWh-Bereich. Erste stationäre Anlagen (75 Stück, je 5 – 15 kWh) werden im Forschungsprojekt Sol-Ion in Deutschland und Frankreich einem Feldtest unterzogen [Saft 2009]. Die Batterien

der Firma Saft sollen vollständig wartungsfrei sein und dienen zur Speicherung von Energie aus netzgekoppelten Photovoltaikanlagen mit einer Maximalleistung von 5 kW<sub>solar</sub>. Weiterhin werden Batterien der gleichen Firma als Hausspeicher für Solaranlagen in Guadeloupe, Reunion angewendet.

In einer Pressemeldung vom 01. März 2010 wurde von Evonik der Bau des ersten Lithiumionen-Elektrizitäts-Speicher-Systems (LESSY, 1 MW, ca. 700 kWh) im MW-Bereich angekündigt [Evonik 2010]. Die Entwicklung und Erprobung erfolgt im Rahmen eines vom BMBF geförderten Gemeinschaftsprojektes bis Januar 2012 am Kraftwerksstandort Völklingen zur Bereitstellung von kurzfristig einzusetzender Primärregelleistung. Dabei kommen die von der Li-Tec Battery GmbH – einem Gemeinschaftsunternehmen von Evonik Industries AG und der Daimler AG – unter dem Namen Cerio<sup>®</sup> station hergestellten Batterien auf Lithium-Keramik-Basis zum Einsatz. Eine Erweiterung auf 10 MW wird in Erwägung gezogen. Zur Hannover Messe 2011 stellte die Konkurrenzfirma Saft ihr Produkt „Intensium Max“ vor, einen 560 kWh-Li-Ion-Batteriecontainer inkl. Batteriemanagementsystem (Abmessungen ca. 6 x 3 x 2,5 m), der zur Anwendung als Zwischenspeicher für erneuerbare Energien auf Mittelspannungsebene gedacht ist. Durch Zusammenschaltung derartiger Systeme sollen Leistungsabgaben bis 50 MW über einen Zeitraum von bis zu einer Stunde ermöglicht werden [Saft 2011].

Aufgrund der relativ neuen Technologie, der Energiedichte und des hohen Wirkungsgrades von 90 bis 95 % wird für diese Batterietypen weiterhin ein großes Entwicklungspotential erwartet. Durch den vermehrten Einsatz ist mit signifikanten Kostensenkungen zu rechnen. Aufgrund der neuesten Entwicklungen für Li-Ion-Großspeicher können derartige Systeme zukünftig auch für den Einsatz als Speicher in Fahrleitungssystemen interessant werden.

## f) Redox-Fluss-Batterien

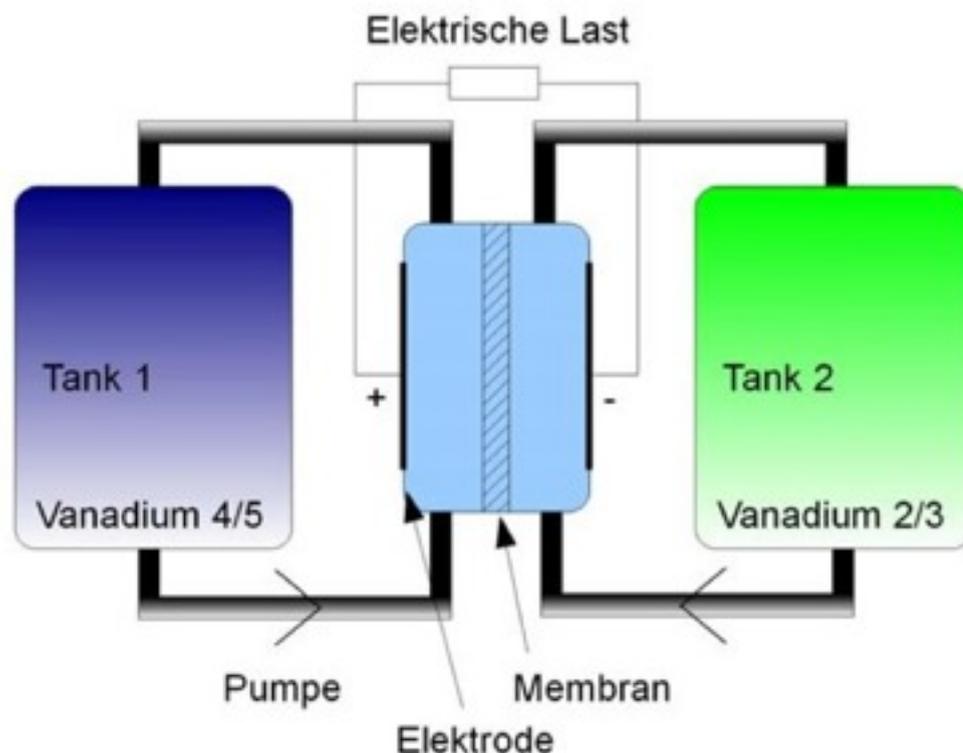
Redox-Fluss-Batterien besitzen flüssige Elektrolyte, in denen Salze als aktive Materialien gelöst sind und die in externen Tanks gelagert werden. Diese Flüssigkeiten werden zum Energieaustausch in die zentrale Reaktionseinheit gepumpt und anschließend in die Tanks zurückgeleitet. Durch die externe Lagerung der Elektrolyte kann die Kapazität der Batterie durch Vergrößerung der Tanks erhöht werden. Die Leistung wird durch die Anzahl der Zellen in der Reaktionseinheit bestimmt. Die Selbstentladung von Redox-Fluss-Batterien ist äußerst gering, da sie nur innerhalb der Reaktionseinheit auftreten kann. Dadurch ist eine Energielangzeitspeicherung möglich.

Nach dem Redox-Fluss-Prinzip kann eine Vielfalt von Stoffkombinationen eingesetzt werden. Als besonders zukunftssträftig erscheinen die Vanadium-Vanadium-Systeme, da dort keine Vergiftung der Elektrolyten durch Durchmischung auftritt. Bei diesen wird unter Einbeziehung aller Hilfsaggregate ein Wirkungsgrad von ca. 75 % erreicht. Die Energiedichte entspricht ebenfalls der von Bleibatterien. Die Zyklenfestigkeit ist, verglichen mit anderen Batteriesystemen, sehr hoch. Gefährdungen können durch die in den Elektrolyten verwendeten Säuren und das relativ gering toxische Vanadium auftreten.

Anlagen bis in den Bereich von MW und MWh wurden bereits errichtet. Zum Beispiel wurden für Windparks in Japan von der amerikanischen Prudent Energy Corporation Anlagen mit einer Leistung von 4 MW und einer Kapazität von 6 MWh errichtet.<sup>1</sup> Grundlage sind Einheiten mit 7 kW Leistung. Allerdings ist auch zu erwähnen, dass eine Reihe geplanter Anlagen anderer Hersteller nicht oder nur in Prototypen reali-

<sup>1</sup> Prudent Energie Corporation, Fallstudie Japan, [www.pdenergy.com/pdfs/casestudy\\_japan.pdf](http://www.pdenergy.com/pdfs/casestudy_japan.pdf), Zugriff v. 15. 4. 2011

siert wurden. In Deutschland entwickeln in der Fraunhofer Gesellschaft mehrere Institute Redox-Fluss-Batterien auf Vanadium-Basis. Derzeit werden Prototypen mit 1 bis 2 kW Leistung erprobt. Ein System im Megawatt-Bereich soll etwa 2016 bereitstehen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass obwohl kommerzielle Anwendungen bereits verfügbar sind, die Technologie noch in der Entwicklung ist. Für den Einsatz als stationärer Energiezwischenspeicher für Fahrleitungsanlagen muss deshalb auf die Zukunft verwiesen werden. Außerdem ist der relativ hohe Raumbedarf zu beachten.



Teil B (I), Abb. 4: Prinzipskizze einer Vanadium-Redox- Fluss-Batterie

## II. Schwungmassenspeicher

Schwungmassenspeicher, auch Schwungrad oder engl. flywheel genannt, sind Systeme, die die kinetische Energie einer rotierenden Masse nutzen. Anfänglich aus Stahl gefertigt und relativ langsam drehend (ca. 3000 bis 5000 Umdrehungen pro Minute), werden neuere Systeme aus hochfesten Faserverbundwerkstoffen (CFK) hergestellt und mit ca. 20000 bis 60000 Umdrehungen pro Minute betrieben. Die speicherbare Energie hängt linear von der Trägheit der Masse und quadratisch von der Rotationsgeschwindigkeit ab. Damit sind mit den schnell drehenden Systemen größere Speicherdichten und kompaktere Bauweisen erreichbar. Die Energieumwandlung erfolgt über ein Motor-Generator-System, das beim Einspeichern die Schwungmasse beschleunigt und beim Ausspeichern die Rotationsenergie in Elektrizität umwandelt. Schwungradspeicher weisen trotz ausgefeilter Lagertechniken und Betrieb im Vakuum sehr hohe Speicherverluste auf.

Damit sind sie grundsätzlich nur für eine Kurzzeitspeicherung geeignet. Ihre wesentlichen

Vorteile bestehen in einer sehr kurzen Bereitstellungszeit auch für große Leistungen, in einem hohen Zyklenwirkungsgrad von 90 bis 95 %, einer hohen Zyklenfestigkeit (ca. 1 Mio. Zyklen), einer langen kalendarischen Lebensdauer, einer hohen Systemzuverlässigkeit in der Größenordnung von 97 bis 98 % und einem geringen Wartungsaufwand. Diese Eigenschaften machen sie für den Einsatz zur Spannungsstabilisierung und Zwischenspeicherung von Rekuperationsenergie in Energieversorgungsnetzen interessant.

Ein zweites Einsatzfeld ist die Bereitstellung von Momentanreserve in unterbrechungsfreien Stromversorgungssystemen (USV). Weitere Anwendungsfelder sind im militärischen und maritimen Bereich und in der Kernenergietechnik zu finden. Prototypisch wurden Schwungradspeicher auch innerhalb von Fahrzeugen zur Bremsenergienutzung eingesetzt. Sie kommen ebenfalls als schnelle Regelenenergiereserve in Energieübertragungsnetzen zum Einsatz. So soll Anfang 2011 ein 20 MW Speicherwerk in Stephentown, NY ans Netz gehen, das mit 200 Schwungradmassespeichern von Beacon Power ausgerüstet ist. Je 10 Speicher aus CFK-Material mit  $16\,000\text{ min}^{-1}$  und einer Leistung von 100 kW mit einem Energieinhalt von 25 kWh sind mit einem Transformator zu einer 1 MW-Einheit zusammengefasst.

Schwungradmassensysteme haben ein relativ geringes Gefahrenpotential, da kaum toxische Stoffe eingesetzt werden. Das einzige Risiko besteht in der Möglichkeit des Berstens aufgrund der hohen rotatorischen Belastung. Dieser Gefahr kann durch entsprechende Umarmantelung des Systems vorgebeugt werden.

Schwungradmassenspeicher sind bereits seit längerer Zeit kommerziell verfügbar. Besonders die langsamer drehenden Systeme gelten als technisch ausgereift. An der Vervollkommnung von schnell drehenden Systemen wird weiter geforscht. Als Hersteller kann eine Reihe von Firmen genannt werden. In Deutschland sind das beispielsweise die Firmen Piller Power Systems in Osterode am Harz und Rosseta Technik GmbH in Roßlau. Weitere Hersteller in unvollständiger Aufzählung sind CCM Centre for Concepts in Mechatronics B.V. in den Niederlanden, Hitec Power Protection, Urenco Power Technologies, Active Power, Beacon Power, Kinetic Traction Systems, Inc oder SatCon Power Systems.

Im Gegensatz zu den bisher aufgezählten Speichertechniken wurden Schwungradmassenspeicher bereits mehrfach als stationäre Zwischenspeicher für Fahrleitungsanlagen von Nahverkehrssystemen eingesetzt. Über einige Anwendungen wurde ausführlich in der Literatur informiert.

Schon im Jahr 2000 wurde bei der üstra in Hannover ein Schwungradmassenspeicher vom Typ Powerbridge der Firma Piller Power Systems installiert, der sonst in kommerziellen USV-Systemen eingesetzt wird [Briest 2000]. Dabei handelte es sich um eine mit  $3600\text{ min}^{-1}$  drehende Stahlschwungradmasse mit einer Maximalleistung von 1 MW und einem nutzbaren Speicherinhalt von rund 5 kWh. Bis Ende 2003 wurden vier weitere derartige Systeme installiert und sowohl zum Energiesparen als auch zur Spannungstützung eingesetzt. In Auswertung von Langzeitmessungen konnten Einsparungen von rund 450000 kWh/a mit einem Speicher nachgewiesen werden [Kähler 2005]. Auch im U-Bahn-Netz der Hamburger Hochbahn werden derartige Systeme eingesetzt. Der erste Speicher wurde 2007 installiert, der zweite 2010.

Entscheidend für den Einsatz eines Schwungradmassensystems waren neben der schnellen Reaktionszeit auch die relativ geringen Kosten. In [Steinhorst 2008] wurden nach ersten Betriebserfahrungen Einsparungen von über 430000 kWh/a für das erste System prognostiziert. Zur wirtschaftlichen Optimierung des Speichereinsatzes wird dieser in der Zeit von Mitternacht bis zum frühen Morgen nicht betrieben. Weitere Schwungradmassenspeicher dieser Firma befinden sich bei der RATP in Paris, in Budapest und bei HTM Den Haag.

Von der Rosetta Technik GmbH wurden erste Tests mit Schwungradspeichern bei den Verkehrsbetrieben in Dessau durchgeführt. Im Jahr 2007 wurde ein Energiespeicher bei der Straßenbahn in Zwickau in Betrieb genommen. Dieser Speicher ist mit einem Schwungrad mit einer Drehzahl von bis zu  $25000\text{ min}^{-1}$ , einem nutzbaren Energieinhalt von 4 kWh und

einer Leistung bis zu 1 MW ausgerüstet.

In [Täubner 2007] finden sich ausführliche Angaben zu den technischen Details und zum Wartungsaufwand. Als jährliche Wartungsaufgaben werden Ölwechsel für Vakuumpumpe und Lager, die Reinigung des Wärmetauschers im Wasserkühlkreislauf und eine Diagnosesemessung durch Rosetta Technik GmbH zur Prüfung des Systemgesamtzustandes genannt. Im Gegensatz zu den Angaben in [Hannig 2009] wird nicht nur für den Schwungmassenspeicher sondern auch für die Lager eine Lebensdauer von mindestens 20 Jahren erwartet. Neben dem in Zwickau verwendeten Speichertyp bietet die Firma auch einen Speicher auf Stahl-Basis und einen kleinformatigen Speicher aus CFK-Material an. Diese Speicher sollen zukünftig über die KAMAG Transporttechnik GmbH & Co. KG in Ulm vertrieben werden.

Auch die Züricher Verkehrsbetriebe testeten im Spätsommer 2009 einen Schwungradspeicher auf einer Steilstrecke der Straßenbahn. Da die Strecke dicht befahren war und bereits ohne zusätzlichen Speicher ca. 85 % der Bremsenergie wieder genutzt wurden, war das zusätzliche Einsparpotential zu gering und nicht wirtschaftlich.

Kinetic Traction Systems, hervorgegangen aus Pentadyne Corporation und Urenco bietet speziell für Nahverkehrssysteme schnell drehende Schwungmassenspeichersysteme auf CFK-Basis an. Testanwendungen dieser Systeme wurden in Eisenbahn- und U-Bahn-Systemen in New York, London und Lyon vorgenommen. Nach eigenen Angaben sollen diese bis zu 10 Mio. Zyklen bei einer Lebensdauer von mindestens 20 Jahren erreichen können.

Insgesamt ist festzustellen, dass stationäre Schwungmassenspeicher in Nahverkehrsnetzen eine Reihe von Anwendungen erfahren haben. Eine Anpassung an örtlichen Gegebenheiten ist für einen optimalen Betrieb stets erforderlich.

### III. Doppelschichtkondensatoren

Doppelschichtkondensatoren werden auch Superkondensatoren (engl. Ultra Caps, Gold Caps, SuperCaps usw.) genannt, weil sie im Gegensatz zu herkömmlichen Kondensatoren durch die Doppelschicht erheblich größere Energiemengen speichern können. Trotzdem ist die Energiedichte im Vergleich mit anderen Speichern sehr gering. Ihre Vorzüge liegen in der Fähigkeit große Leistungen schnell aufzunehmen bzw. abzugeben, in einer hohen Zyklenfestigkeit von etwa 500000 Zyklen und einem Wirkungsgrad von rund 95 %. Die kalendarische Lebensdauer wird mit ca. 10 Jahren angegeben. Die Speicherverluste sind nicht so hoch wie bei Schwungmassenspeichern aber höher als bei Batteriespeichern. Damit sind sie für den Einsatz als Kurzzeitspeicher mit hoher Leistungsabgabe vorbestimmt. Nachteilig sind die relativ hohen Kosten.

Das Gefahrenpotential von Doppelschichtkondensatoren ist gering. Nur die Verwendung von Elektrolyten auf der Basis von Acetonitril, eines brennbaren und giftigen Stoffes, stellt bei einigen Typen ein Risiko dar. In Japan ist der Einsatz solcher Elektrolyte verboten. In Europa werden sie zum Teil noch angeboten und eingesetzt. An Ersatzmaterialien wird geforscht.

Doppelschichtkondensatoren sind bei der Entsorgung als Sondermüll zu behandeln, was bei einem Austausch zusätzliche Kosten verursacht. Daher sollten beim Kauf die Rücknahmebedingungen für gebrauchte Doppelschichtkondensatoren geregelt werden.

Das Einsatzfeld von Doppelschichtkondensatoren reicht von Anwendungen vor allem in der Automobilindustrie bis zur Nutzung in kleinen Energienetzen zur Sicherung der Versorgungsqualität. Anbieter von Doppelschichtkondensatoren sind beispielsweise Maxwell Technologies, Panasonic, NESS Capacitor Company, WIMA und weitere.

Für den Einsatz als stationäre Speicher für Fahrleitungsnetze werden von den Bahnherstellern Siemens und Bombardier konfektionierte Systeme angeboten. Auch am Fraunhofer-Institut für Verkehrs und Infrastruktursysteme IVI wurde eine solche Anlage für For-

schungsaufgaben entwickelt. Das Speichersystem von Siemens wird unter dem Namen „Stationärer Energiespeicher für die DC-Bahnstromversorgung - Sitras SES“ vertrieben. Es ist konzipiert für Bahnsysteme mit 600 oder 750 V Gleichspannung. Der nutzbare Energieinhalt beträgt 2,5 kWh, die Spitzenleistung 700 kW. Das System ist in vier Doppelschränken untergebracht (2 Stück a 1,4 x 0,7 x 2,6 m + 2 Stück a 1,3 x 2,0 x 2,6 m) und kann auch in Containern parallel zur Strecke aufgestellt werden. Eine Kaskadierung des Speicherinhalts ist möglich.

Zwischen den Betriebsmodi Energiesparen und Spannungsstabilisierungen kann automatisch umgeschaltet werden. Der Wartungsaufwand sei geringer als bei Schwungmassesystemen. Von Siemens werden mögliche Energieeinsparungen von bis zu 500000 kWh pro Jahr angegeben. Der weltweit erste Prototyp eines solchen statischen Energiespeichers für Bahnsysteme wurde im März 2001 an der Stadtbahnlinie 1 der Kölner Verkehrsbetriebe installiert. Weiter folgten Installationen in Portland, Dresden, Madrid, Bochum und Peking. In Köln sind mittlerweile vier und Madrid zwei solcher Systeme im Einsatz.

Das Speichersystem von Bombardier wird unter dem Namen EnerGstor™ vermarktet und ist Teil der ECO4™-Technologien, der Markenbezeichnung von Bombardier für Umwelttechnologien. Das System ist skalierbar und lässt sich auf Kapazitäten von 0,25 – 5,0 kWh oder auch mehr auslegen. Es ist für den Einsatz in Gleichspannungsnetzen von 600 und 750 V konzipiert. Optional ist eine Variante für 1500 V erhältlich. Für die Berechnung der wirtschaftlichsten Einsatzoption kann das Simulationstool EnerGPlan™ von Bombardier eingesetzt werden.

Als wesentliche Merkmale werden die kompakte Bauweise, keine Notwendigkeit von Bauarbeiten beim Einsatz in Standardsituationen und geringstmögliche Hardware- und Einbaukosten genannt. Für Geräte mit einem nutzbaren Energieinhalt von 1 kWh wird die maximale Leistungsabgabe mit 650 kW beziffert. Die Abmessungen eines solchen Gerätes betragen 1,8 x 1,8 x 2 m. Während der geplanten Lebensdauer einer EnerGsto-Anlage sei abgesehen von einfachen Wartungsmaßnahmen wie Inspektionen und präventiven Reinigungen keinerlei laufende Wartung erforderlich.

### 3. Zusammenfassung

**Batteriespeicher** sind aufgrund ihrer relativ geringen Zyklenfestigkeit in der Regel nicht für den Einsatz als stationäre Energiespeicher für Fahrleitungsanlagen geeignet. Eventuell ergeben sich aus den neuesten Entwicklungen für Großanlagen von Li-Ion-Batterien für die Zukunft Einsatzmöglichkeiten.

**Schwungmassenspeicher** werden bei mehreren ÖPNV-Unternehmen als stationäre Energiespeicher mit Erfolg verwendet. Industriell angeboten werden nur die Speichersysteme. Zusätzlich notwendige Installationsarbeiten und ggf. Baumaßnahmen zum Anschluss der Systeme an das Energienetz des ÖPNV- Unternehmens müssen in Zusammenarbeit mit dem Speicheranbieter erarbeitet werden.

Auf der Basis von **Superkondensatoren** werden von zwei großen im Bahnbereich tätigen Firmen vorkonfektionierte Speichersysteme angeboten. Erfahrungen mit dem betrieblichen Einsatz derartiger Systeme liegen seit 2001 bei verschiedenen Verkehrsbetreibern vor. Die angebotenen Systeme sind skalierbar und für einen schnellen Einsatz mit geringem Bau- und Wartungsaufwand ausgerüstet.

## Anhang - Eigenschaften verschiedener Speichertypen

	Blei-Säure-Batterien (Industrie)	NiCd-Batterien	NiMH-Batterien	Li-Ion-Batterien (mobil und stationär)	Redox-Flow-Batterien (Vanadium)	Doppelschichtkondensatoren	Schwungmas-senspeicher
<b>Energie-dichte</b> [Wh/l]	80 - 90* 70 - 130**	50 - 200*	100 - 150*	500 - 1000* 200 - 400**	90* 20-30**	<5* 2 - 5**	25*
	[Wh/kg] 25 - 35* 25 - 45**	30 - 50*	50 - 80*	90 - 160* 75 - 200**	25 - 50*	3 - 5* 1 - 10**	5 - 100** (Stahl/CFK)
<b>Leistungs-dichte</b> [W/l]	100 - 140**	k.A.	k.A.	700 - 1000**	5**	<i>Modul</i> 10 - 50**	<i>Modul</i> 1000 - 2000** <i>System</i> 40 - 180** 275*
	[W/kg] 75 - 300** 100*	600* 400 - 600***	600 - 1000*	1300 - 3000 (mobil)* 150 - 315** 200 - 700 (stationär)*	70 - 90*	2000 - 10000*	400 - 1500*
<b>spez. Investitions-kosten</b> [€/kWh] oder [€/kW]	150 - 350** 100 - 250*	250 - 500*	180 - 220*	300 - 1800* 500 - 1000**	250 - 400* 300 - 800**	10000 - 70000* einige 10000##	sehr stark ab-hängig von Material und Drehzahl
	1000 - 2000*	k.A.	k.A.	1500 - 4000**	1500 - 4000*	k.A.	100 - 360* z.B. CFK 250##
<b>max. Zyklen-zahl (bei 80 % Entladetiefe)</b>	500 - 1000** 1200* BEWAG: ~7000 Nennladungs- zyklen	2000*	1000*	5000 Vollzy- klen* 3000**	13000* 13000**	~500.000* ~500.000**	max. Zyklenzahl >1.000.000**
<b>Zykleneffizi-enz (Wir-kungsgrad)</b>	75 - 80%* 75 - 85%*	60 - 80%* 70%####	70%*	90 - 95%* 90 - 95%**	75 - 80%* 75%**	85 - 95%* ca. 95%**	85 - 90%* 90 - 95%**
<b>typische Anlagen-größen</b>	kW - MW* kWh - MWh* 1-5 MW; 10 MWh; **	W - kW* Wh - kWh*	W - kW* Wh - kWh*	kW*, kWh* 2011 neu: bis MW und MWh	kW - MW* kWh - MWh*	kW - kWh	kW - MW
<b>Beispiele für Großanlagen</b>	Herne (Solar): 1,2 MW, 1,2 MWh;  BEWAG: 17 MW, 14 MWh	Fairbanks, Alaska: 2* 20 MW, ca. 6,5 MWh	keine Groß-anlagen bekannt	Saft, Hannover Messe 2011: Intensium Max Container (MW) Li-Tec,  Evonik: LESSY 1 MW- De- monstrator im Kraftwerk Völklingen	Windpark Donegal, Nordirland: 2 MW, 12 MWh  PacifiCorp, USA: 250 kW, 2 MWh für Lastausgleich ****	Fahrleitun- gen: Köln, Bochum, Madrid, Peking, zeitweise: Portland, Dresden	Fahrleitungen: Hamburg Han- nover, Zwickau, MTA New York  Energieversor- gung: New York 20 MW- Speicherwerk
<b>Speicher-ver-lust, Selbst-entladung</b>	gering <0,1%/d** 2-10%/Monat	5-10% pro Monat*	15-25% pro Monat*	gering <5%/Monat* <0,1%/d**	gering nur in der Reaktions- zelle: <0,1%/d**	<1%/d mittel - gering**	hoch 3-20%/h* bis 100%/d**

	Blei-Säure-Batterien (Industrie)	NiCd-Batterien	NiMH-Batterien	Li-Ion-Batterien (mobil und stationär)	Redox-Flow-Batterien (Vanadium)	Doppelschichtkondensatoren	Schwungmassenspeicher
<b>Ansprechzeit</b>	schnell <1 s**	schnell	schnell	schnell <1 s**	schnell <100 ms**	schnell <1 s**	schnell <1 s**
<b>kalendari-sche Nut-zungsdauer</b>	5-15 Jahre*	5-15 Jahre*	<5 Jahre*	10-15 Jahre*	15 Jahre*	8-10 Jahre*	~ 20 Jahre* (Lager: 5 - 7 Jahre**)
<b>Technologie-verfügbar-keit</b>	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell, Großanlagen in Einführung	Prototypen, in Anfängen kommerziell	kommerziell, konfektionierte Lösungen für Fahrleitungsanlagen	kommerziell (USV), Einzelanwendungen für Fahrleitungsanlagen und Großanlagen
<b>Risiken</b>	gering <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrolyt ätzend</li> <li>• Explosionsgefahr durch austretende Gase</li> </ul>	umweltschädlich <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrolyt ätzend</li> <li>• Explosionsgefahr durch austretende Gase</li> <li>• Cadmium seine Dämpfe sind hochgiftig!</li> </ul>	k.A.	gering für neuere Typen <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reaktionsfreudigkeit von Lithium</li> <li>• Explosions- und Brandgefahr bei Zerstörung, Überlastung, Überhitzung</li> </ul>	gering <ul style="list-style-type: none"> <li>• Säure</li> <li>• Vanadium kann toxisch wirken durch Auffangbecken sichern</li> </ul>	gering <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrolyte (Acetonitril) können toxisch und brennbar sein</li> </ul>	gering <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verletzungsgefahr durch Bersten, wird durch entspr. Gehäuse verhindert</li> </ul>

#### Quellen:

- \* [Hannig 2009]
- \*\* [Wietschel 2010]: Die Kostenangaben sind i. d. R. eine zusammenfassende Bewertung eigener Analysen und der Angaben aus [Gatzen 2008], [Chen 2008], [Sauer 2006], [Gonzales 2004]
- \*\*\* [DTI 2004]
- \*\*\*\* [Noack 2009]
- # [Schäfer 2009]
- ## [Sauer 2006]
- ### eigene Befragung 2011
- #### [VDE 2009]

## Quellenangabe Teil B (I)

### Stationäre Energiespeichersysteme in Fahrleitungsnetzen von Nahverkehrsbahnen und O-Bussen

#### Häufig besuchte Internetseiten:

Beacon	Beacon Power; <a href="http://www.beaconpower.com">www.beaconpower.com</a>
Evonik	Industries AG corporate. <a href="http://www.evonik.com">www.evonik.com</a> ; <a href="http://www.evonik-steag.de">www.evonik-steag.de</a>
GAIA	Akkumulatorenwerke GmbH; <a href="http://www.gaia-akku.com">www.gaia-akku.com</a>
Hitec	Hitec Power Protection; <a href="http://www.hitec-ups.com">www.hitec-ups.com</a>
HOPPECKE	HOPPECKE Advanced Battery Technology GmbH; <a href="http://www.hoppecke.com">www.hoppecke.com</a>
KTS	Kinetic Traction Systems, Inc.; <a href="http://www.kinetictraction.com">www.kinetictraction.com</a>
Li-Tec	Li-Tec Battery GmbH; <a href="http://www.li-tec.de">www.li-tec.de</a>
FZ SONICK S.A.	FZ SONICK S.A. (Ehemals MES DEA Divisione Energie Alternative); <a href="http://www.fzsonick.com">www.fzsonick.com</a> ; <a href="http://www.cebi.com/cebi/content/index_html?a=5&amp;b=9&amp;c=19&amp;d=69">www.cebi.com/cebi/content/index_html?a=5&amp;b=9&amp;c=19&amp;d=69</a>
Piller	Piller Power Systems GmbH; <a href="http://www.piller.com">www.piller.com</a>
Prudent	Prudent Energy Corporation, USA; <a href="http://www.pdenergy.com">www.pdenergy.com</a>
Rosetta	Rosetta Technik GmbH; <a href="http://www.rosetta.de">www.rosetta.de</a>
Saft Batterien	Saft Industrial Battery Group; <a href="http://www.saftbatteries.com">www.saftbatteries.com</a>

#### Literatur

Beacon 2010: Beacon Power: 20 MW Frequency Regulation Plant, November 3, 2010, [www.beaconpower.com/files/DOE-ESS-update-ppt-11.10.pdf](http://www.beaconpower.com/files/DOE-ESS-update-ppt-11.10.pdf), Zugriff v. 17. 3. 2011

Briest 2000: Briest, R., Kähler, S.: Einsatz rotierender Energiespeicher im Fahrleitungsnetz der üstra Hannover. In eb - Elektrische Bahnen (98), 2000, Heft 5/6, S. 214 – 221

Bombardier EnerGstor: Bombardier Transportsysteme, Produktinformation: EnerGstor - Streckenseitige Energiespeicherung, [www.bombardier.com/files/de/supporting\\_docs/BT-ECO4- EnerGstor.pdf](http://www.bombardier.com/files/de/supporting_docs/BT-ECO4- EnerGstor.pdf), Zugriff vom 15.3.2011

Chen 2008: Chen, H. u. a.: Progress in electrical energy storage system: A critical review. In: progress in Natural Science 19 (2009) S. 291-312

DTI 2004: DTI - GLOBAL WATCH MISSION REPORT: Electrochemical Energy Storage – a Mission to the USA, November 2004, [www.spinovation.com/sn/Batteries/GLOBAL\\_WATCH\\_MISSION\\_REPORT.pdf](http://www.spinovation.com/sn/Batteries/GLOBAL_WATCH_MISSION_REPORT.pdf), Zugriff v. 18.4.2011

Evonik 2010: Evonik Industries, Pressemitteilung vom 1. März 2010: Evonik entwickelt die größte Lithium-Keramik-Batterie der Welt, [www.evonik-steag.de/sites/energy/de/presse/Pages/news-details.aspx?newsid=10311](http://www.evonik-steag.de/sites/energy/de/presse/Pages/news-details.aspx?newsid=10311), Zugriff v. 26.4.2011

Gatzen 2008: Gatzen, Christoph: The Economics of Power Storage – Theory and Empirical Analysis for Central Europe. Oldenbourg Industrieverlag, München 2008

Godbersen 2004: Godbersen, Ch., Höschler, P.: Erfahrungen mit statischen Energiespeichern in der DC-Bahnenergieversorgung. In eb - Elektrische Bahnen (102), 2004, Heft 5, S. 217 – 222

Gonzalez 2004: Gonzales, A. u. a.: Study of Electricity Technologies and their Potentials to Address Wind Energy Intermittency in Ireland. Sustainable Energy Research Group; 2004

Hannig 2009: Hannig, Florian u. a.: BMWi-Auftragsstudie 08/28 „Stand und Entwicklungspotenzial der Speichertechniken für Elektroenergie – Ableitung von Anforderungen an und Auswirkungen auf die Investitionsgüterindustrie, 2009, [www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/speichertechniken-elektroenergie,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf](http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/speichertechniken-elektroenergie,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf), Zugriff vom 14.2.2011

Hochbahn 2009: Hamburger Hochbahn: Unternehmensbericht 2009.[www.hochbahn.de/wps/wcm/connect/39135980433ae86d83c6dbed8c1618a7/HOCHBAHN\\_UB\\_2009\\_DE.pdf?MOD=AJPERES](http://www.hochbahn.de/wps/wcm/connect/39135980433ae86d83c6dbed8c1618a7/HOCHBAHN_UB_2009_DE.pdf?MOD=AJPERES), Zugriff v. 14.4.2011

Kähler 2005: Kähler, S., Habel, D.: Ergebnisse des Energiespeichereinsatzes in Hannover Fahrenheide. In eb - Elektrische Bahnen (103), 2005, Heft 6 S. 301 – 304

Mazoni 2008: Mazoni, R., Metzger, M., Crugnola, G.: Zebra Electric Energy Storage System: From R&D to Market. Vortrag auf HTE hi.tech.expo, Mailand, 25.-28. November 2008, [cebinew.kicms.de/cebi/easyCMS/FileManager/Files/MES-DEA/papers/HTE\\_08\\_paper.pdf](http://cebinew.kicms.de/cebi/easyCMS/FileManager/Files/MES-DEA/papers/HTE_08_paper.pdf), Zugriff v. 28.4.2011

Noack 2009: Jens Noack, Sascha Berthold, Jens Tübke: Lastausgleich durch Redox-Flow- Batterien, Erschienen in: Energy 2.0-Kompodium 2009, S. 200; [www.energy20.net/pi/?StoryID=317&articleID=152659](http://www.energy20.net/pi/?StoryID=317&articleID=152659), Zugriff v. 20. 4.2011

Price 2005: Electrical energy storage – a review of technology options, in Proceedings of ICE, Civil Engineering 158, November 2005, Seiten 52–58, Paper 14175, [www.swanbarton.com/downloads/a\\_price\\_civ\\_en\\_store.pdf](http://www.swanbarton.com/downloads/a_price_civ_en_store.pdf), Zugriff v. 18.4.2011

Saft 2009: Saft-Pressemitteilung vom 10. Juni 2009: Solion, Europas größtes Projekt für Umwandlung und Speicherung von PV-Energie kommt in die Felderprobungsphase. [www.saftbatteries.com/SAFT/UploadedFiles/PressOffice/2011/CP\\_20-10\\_de.pdf](http://www.saftbatteries.com/SAFT/UploadedFiles/PressOffice/2011/CP_20-10_de.pdf), Zugriff v. 15.4.2011

Saft 2011: Saft-Pressemitteilung vom 4. April 2011: Saft introduces Intensium Max megawatt scale containerized energy storage system. [www.saftbatteries.com/SAFT/UploadedFiles/PressOffice/2011/CP\\_16-11\\_en.pdf](http://www.saftbatteries.com/SAFT/UploadedFiles/PressOffice/2011/CP_16-11_en.pdf), Zugriff v. 15.4.2011

Schäfer 2009: Schäfer, Tim, Li-Tec Battery Kamenz/Sachsen: Batterietechnologie: Trends, Entwicklungen, Anwendungen. Vortrag auf dem 3. Expertentreffen der Energiemetropole Leipzig am 7. 12. 2009, [www.energiemetropole-leipzig.de/tl\\_files/Energiemetropole/Expert09/vortraege/5\\_Vortrag\\_Schaefer\\_Li-Tec\\_Energie\\_Metropole%20Leipzig\\_Battery\\_Tim.pdf](http://www.energiemetropole-leipzig.de/tl_files/Energiemetropole/Expert09/vortraege/5_Vortrag_Schaefer_Li-Tec_Energie_Metropole%20Leipzig_Battery_Tim.pdf), Zugriff v. 26.4.2011

Siemens SITRAS SES: Siemens Transportation, Produktinformation: Stationärer Energiespeicher für die DC-Bahnstromversorgung Sitras SES, [www.mobility.siemens.com/shared/data/pdf/www/turnkey\\_systems/sitras\\_ses\\_pi\\_120\\_00.pdf](http://www.mobility.siemens.com/shared/data/pdf/www/turnkey_systems/sitras_ses_pi_120_00.pdf), Zugriff vom 4.2.2011

Stadtwerke Herne: Stadtwerke Herne AG – Batteriespeicher: [www.stadtwerke-herne.de/index/unternehmen/umwelt/energiepark\\_mont\\_cenis/batteriespeicheranlage.html](http://www.stadtwerke-herne.de/index/unternehmen/umwelt/energiepark_mont_cenis/batteriespeicheranlage.html)

Steinhorst 2008: Steinhorst, Frank, Jonassen, Ingo, Peters, Arne: Mit Schwung Energie sparen - Stationärer Schwungmasse-Energiespeicher bei der Hochbahn AG. in Der Nahverkehr, 06 (2008), S. 16 ff.

Täubner 2009: Täubner, Frank: Vortrag September 2009: Reduzierung des Energiebedarfs durch Schwungradspeicher. [www.rosseta.de/texte/vor-sps09.pdf](http://www.rosseta.de/texte/vor-sps09.pdf), Zugriff v. 14.4.2011

Täubner 2007: Täubner, Frank: Produktbeschreibung und Datenblatt – Energiespeicherwerk für Gleichstromnetze im Nahverkehr. [www.rosseta.de/texte/bahnsrs.pdf](http://www.rosseta.de/texte/bahnsrs.pdf), Zugriff v. 14.4.2011

VDE 2009: Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energieträger – Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf. Frankfurt, 2009

Wietschel 2010: Wietschel, Martin u. a.: Energietechnologien 2050 – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung. Fraunhofer-Verlag, 2010





# **TEIL B (II)**

## **Untersuchung über die Auswahl und den Einsatz eines Energiespeichers im Fahrleitungsnetz von O-Bussen**



IVI

Im Auftrag der Barnimer Busgesellschaft mbH erarbeitet durch:

**Fraunhofer-Institut  
für Verkehrs- und Infrastruktursysteme  
Zeunerstraße 38  
D - 01069 Dresden**

# 1. Fahrzeugsimulation und Netzberechnung (MAN NGE 152)

Die vorgestellten Simulationsarbeiten dienen einer Abschätzung des Potentials zur Steigerung der Energieeffizienz beim O-Bus Betrieb der Barnimer Busgesellschaft mbH (BBG) durch Einspeicherung bislang ungenutzter Bremsenergie mittels stationärer Energiespeicher. Diese Abschätzung bildet die Grundlage für eine Auswahl geeigneter Energiespeichertechnologie sowie deren Dimensionierung zur Erschließung des vorhandenen Energiesparpotentials.

Das bekannte Antriebskonzept des Oberleitungsgeführten Busbetriebs basiert auf vollelektrischen Bussen sowie wegseitiger Infrastruktur für deren kontinuierliche Energieversorgung und besteht **fahrzeugseitig** aus:

- einem elektrischen Fahrmotor,
- einem Spannungszwischenkreis,
- einem elektrischen Fahrzeugbordnetz,
- einem Bremschopper,
- einem Dachstromabnehmer,

und **wegseitig** aus kontinuierlich über den Streckenverläufen verlegten Oberleitungssystemen zur Energieverteilung, bestehend aus:

- Hin- und Rückleiter zu den Einspeisepunkten,
- Querverbindern,
- Streckentrennern zur Trennung benachbarter Speiseabschnitte und
- Masttrennschaltern an den Einspeisepunkten.

sowie Anlagen zur Energiebereitstellung, bestehend aus:

- Unterwerken zur Energiewandlung aus dem Mittelspannungsnetz und Einspeisung in das Gleichspannungsnetz in Form von Dioden-Gleichrichtern und
- erdverlegten Zuleitungen (Hin- und Rückleiter) zu den Masttrennschaltern.

## 1.1 Randbedingungen und Annahmen der Fahrzeugsimulation

### 1.1.1 Datenbasis Fahrzeuge

Tabelle 1 enthält eine Zusammenfassung der für die Simulationsarbeiten verwendeten Fahrzeugdaten (Bereitstellung durch Auftraggeber) sowie Bemerkungen im Falle getroffener Annahmen.

Fahrzeugdaten	Einheit	NGE 152	Bemerkungen
<b>Leergewicht</b>	t	19,6	
<b>zulässiges Gesamtgewicht</b>	t	28,0	
<b>Beförderungskapazität</b>	„Pers.“	121	
<b>mittlerer Beladungszustand</b>	„-“	1/3	Annahme
<b>Nennleistung</b>	kW	250	
<b>Länge Wagenkasten</b>	m	18,0	

Fahrzeugdaten	Einheit	NGE 152	Bemerkungen
<b>Nenn Drehzahl Motor</b>	1/min	1370	
<b>Maximaldrehzahl Motor</b>	1/min	2600	
<b>Höchstgeschwindigkeit</b>	km/h	70	
<b>maximale Anfahrbeschleunigung</b>	m/s <sup>2</sup>	1,3	
<b>maximale Bremsverzögerung</b>	m/s <sup>2</sup>	- 0,8	
<b>Treibraddurchmesser</b>	m	0,945	
<b>Getriebeübersetzung</b>	-	6,2	
<b>Anzahl Antriebsmotoren</b>	-	1	
<b>Rollreibungsbeiwert der Bereifung</b>	-	0,007	Annahme
<b>installierte Hilfsbetriebeleistung</b>	kW	70	
<b>Hilfsbetriebeleistung (kontinuierlich)</b>	kW	2/30	Sommer/Winter Annahme
<b>Spannungsniveau Bremswiderstand</b>	V	750	
<b>min. zulässige Fahrzeugspannung</b>	V	480	
<b>zulässiger Strom im Speiseabschnitt</b>	A	1600	

Teil B (II), Tabelle 1: Annahmen für Fahrzeugdaten

Der O-Bus-Betrieb in Eberswalde wird auf zwei Strecken (861/862) durchgeführt, welche unterschiedliche Anfangspunkte (861-Nordend, 862-Ostend) und einen angenähert gemeinsamen Endpunkt (Kleiner Stern, Schönholzer Straße) haben.

Zwischen den Haltestellen Am Markt und Eisenspalterei befahren die Fahrzeuge beider Linien ein identisches Teilstück des Streckennetzes. Hin- und Rückstrecke der beiden Linien sind nicht identisch, da die Linie 861 in den Abschnitten Eisenspalterei-Schönholzer Straße und Ackerstraße-Nordend und die Linie 862 im Abschnitt Eisenspalterei-Kleiner Stern auf den Rückstrecken jeweils entgegengesetzt zur Hinstrecke geführt werden. Es ergeben sich die Streckenlängen nach Tabelle 2.

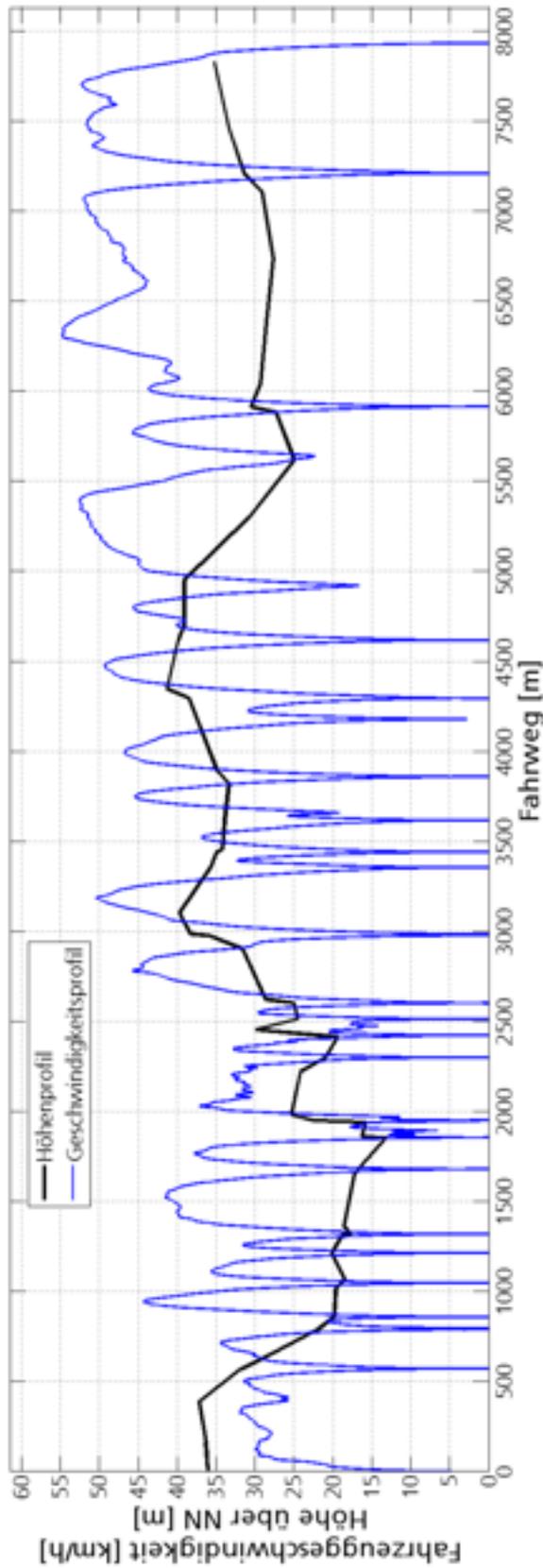
Linie	Streckenbeschreibung	Länge
861 Hin	Nordend > Kleiner Stern	7920 m
861 Rück	Kleiner Stern > Brandenburgisches Viertel > Nordend	10630 m
862 Hin	Ostend > Brandenburgisches Viertel > Kleiner Stern	10020 m
862 Rück	Kleiner Stern > Ostend	8105 m

Teil B (II), Tabelle 2: Buslinien der Barnimer Busgesellschaft mbH

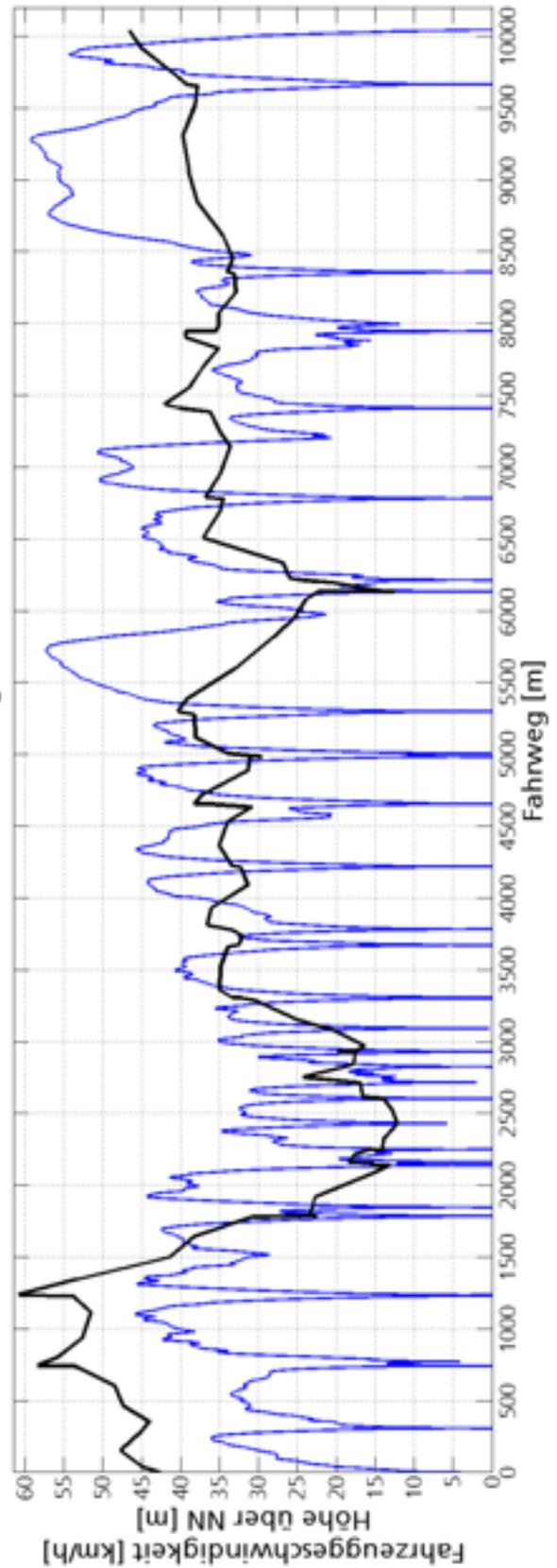
Für die Auslegung elektrisch betriebener Fahrzeuge des ÖPNV existiert derzeit kein standardisierter Fahrzyklus. Daher wurden die für die Simulationsarbeiten benötigten Belastungsprofile aus Messdaten gebildet, die das Fraunhofer IVI an einem MAN NGE 152 im Linienbetrieb auf den Linien 861 und 862 im Zeitraum 18.03.-04.05.2011 gewonnen hat.

Aus der dabei entstandenen Datenbasis wurden durch spezielle Bearbeitungsverfahren die für die Simulationsrechnungen verwendeten Geschwindigkeits-Weg-Profile für die Linien 861 und 862 und zugehörige Streckenbeschreibungen (vgl. Abbildung 1) abgeleitet.

Linie 861 H Nordend --> Kleiner Stern



Linie 862 H Ostend --> Brandenburgisches Viertel --> Kleiner Stern



Teil B (II), Abb. 1: Höhen- und Geschwindigkeitsprofile über dem Fahrweg der Linien 861 und 862 der Barnimer Busgesellschaft mbH

### *Wirkungsgrad Rad-Zwischenkreis*

Die Leistungsübertragungstrecke zwischen den angetriebenen Rädern der Fahrzeuge und deren elektrischen Zwischenkreis beinhaltet mehrere verlustbehaftete Übertragungsglieder, deren Wirkungsgrad entweder in direkter Abhängigkeit zur übertragenen Leistung (Antriebsstromrichter und Achsgetriebe) steht oder zusätzlich von der Fahrgeschwindigkeit und der Richtung des Leistungsflusses (Antriebsmotor) bestimmt wird.

Da kein Wirkungsgradkennfeld in Abhängigkeit von Antriebsleistung und Fahrgeschwindigkeit, getrennt nach motorischem und generatorischem Betrieb, für die Gesamtheit der Übertragungsglieder abgeleitet werden kann, wurde auf ein entsprechendes Wirkungsgradkennfeld eines vergleichbaren, vollelektrischen Fahrzeuges zurückgegriffen.

## **1.1.2 Beschreibung der Simulationsrechnung - Fahrzeugsimulation**

Auf der Basis der Fahrzeug- und Streckendaten wurde mittels bekannter Berechnungsvorschriften der Fahrdynamik der resultierende Leistungsbedarf am Antriebsrad für jedes Fahrzeug ermittelt. Unter Ansatz eines Wirkungsgradkennfeldes für die Leistungsübertragung zwischen Antriebsachse und Fahrzeugzwischenkreis (vgl. Abschnitt 1.1.1) erfolgte die Berechnung der resultierenden elektrischen Antriebs-/Bremsleistungen am Spannungszwischenkreis der Fahrzeuge.

Die Berechnungsergebnisse beinhalten einen konstanten mittleren Bedarf elektrischer Hilfsbetriebe nach Tabelle 1.

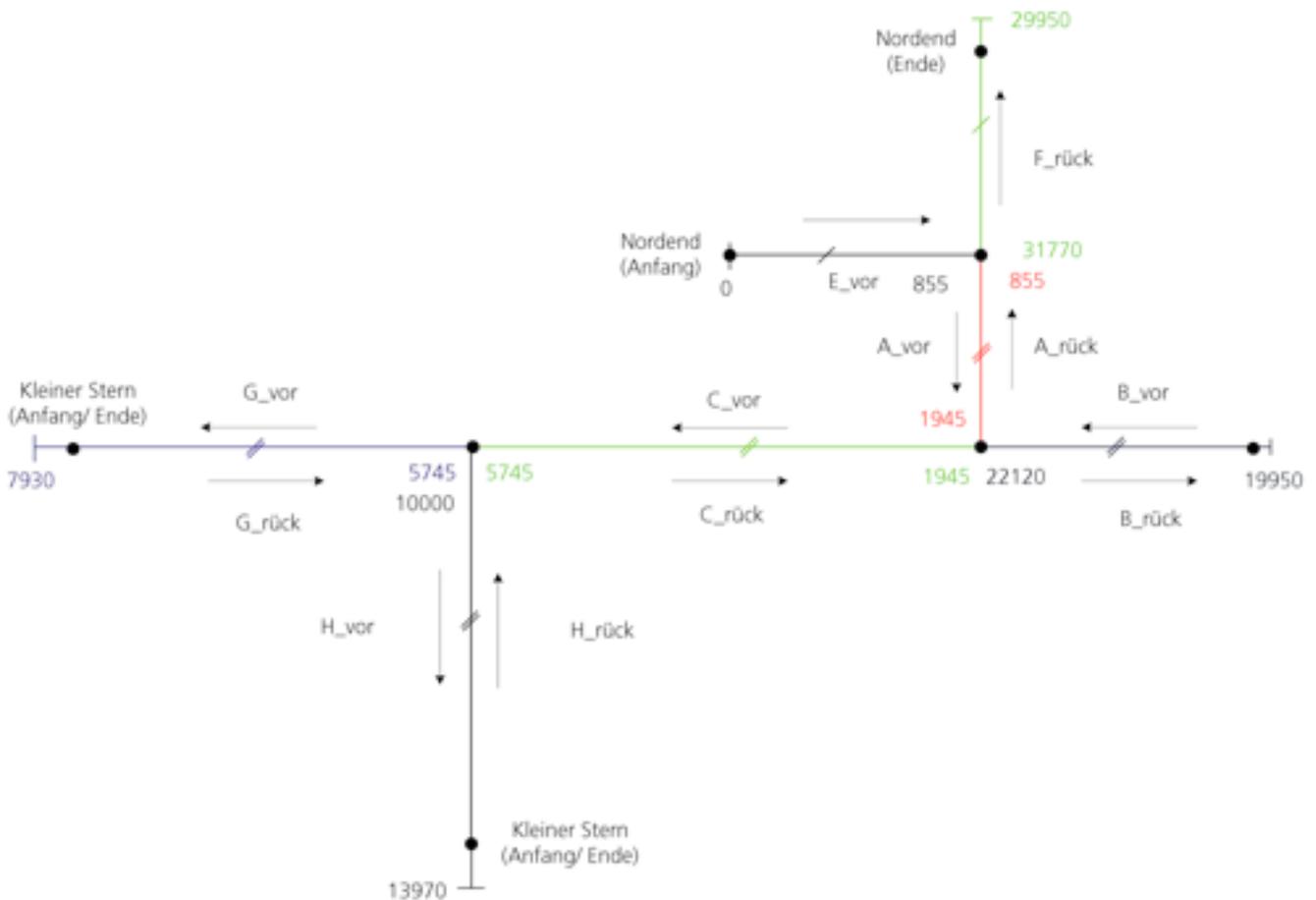
## **1.2 Randbedingungen und Annahmen der Netzberechnung**

### **1.2.1 Datenbasis Energieversorgung**

#### *Kilometrierung für Simulation*

Aus rechentechnischen Gründen ist es notwendig, die zu befahrenden Streckenabschnitte hinsichtlich der Kilometrierung eindeutig voneinander zu unterscheiden (Abbildung 2). Unter Kilometrierung wird dabei die Vorgabe von Streckenlängen verstanden, die ein Fahrzeug, je nach Buslinie, nacheinander zu befahren hat. Es ist programmtechnisch möglich, bei zweiseitiger Verlegung der Oberleitung über der Fahrbahn und deren Nutzung aller Linien in Hin- und Rückrichtung, die Kilometrierung über dem Fahrabschnitt nur einmal vorzunehmen.

Für das Liniennetz der Barnimer Busgesellschaft mbH kann dies zwischen den markanten Streckenpunkten Viertelmeilenstein (855/31770 m) und Eisenspalterei (5745/10000 m) erfolgen. Für die Abschnitte zwischen Nordend (0/29950 m) und Viertelmeilenstein, Ostend (19950 m) und Markt (1945/22120 m) sowie zwischen Kleiner Stern (7930/13970 m) und Eisenspalterei muss die Kilometrierung separat für Hin- und Rückrichtung vorgenommen werden.



Teil B (II), Abb. 2: Streckenabschnitte Eberswalde mit gewählter Kilometrierung

Durch Vorgabe der zu befahrenden Streckenabschnitte in definierter Reihenfolge wird innerhalb des Simulationsprogramms die Zuweisung einer Buslinie realisiert.

#### Unterwerke und Fahrleitungsabschnitte

Die Modellierung des elektrischen Netzes erfolgte auf der Basis von Unterlagen der Barnimer Busgesellschaft mbH mit Stand von 12/2005, die dem Fraunhofer IVI am 18.02.2012 zur Verfügung gestellt wurden. Das Oberleitungsnetz der Barnimer Busgesellschaft mbH besteht demnach aus 10 Fahrleitungsabschnitten, welche durch 3 Gleichrichterunterwerke über 13 Einspeisestellen versorgt werden. Die Nennspannung aller Unterwerke wurde einheitlich mit 680 V angenommen und deren Innenwiderstand mit 15 mΩ unterstellt. Tabelle 3 enthält die bei der Netzmodellierung berücksichtigten Einspeisestellen der Unterwerke, gekennzeichnet als Mastschalter (MS) und die angenommenen Leitungslängen der Anschlusskabel zwischen den Unterwerksklemmen und den Einspeisepunkten.

Unterwerk	Einspeisung	Bezeichnung	Kilometrierung	Leitungslänge	Bemerkung
<b>OST</b>	S1 Ost	MS 1	30325	1941 m	einseitig
	S1 Ost	MS 2	30965	1734 m	einseitig
	S1 Ost	MS 3	881	861 m	einseitig
	S2 Ost	MS 4	1729	35 m	

Unterwerk	Einspeisung	Bezeichnung	Kilometrierung	Leitungslänge	Bemerkung
	S3 Ost	MS 5	22000	314 m	
	S4 Ost	MS 6	20837	1470 m	
	S1 Mitte	MS 7	3465	1403 m	
<b>MITTE</b>	S2 Mitte	MS 8	4195	2135 m	
	S1 West	MS 9	5285	1762 m	
<b>WEST</b>	S2 West	MS 10	10584	1873 m	
	S2 West	MS 11	11500	2859 m	
	S4 West	MS 12	7715	766 m	
	S3 West	MS 13	6945	83 m	

Teil B (II), Tabelle 3: Einspeisestellen und Leitungslängen der UW-Anschlüsse

### Netztrennstellen

Für eine sachgerechte Modellierung eines elektrischen Fahrleitungsnetzes ist neben der Kenntnis der Unterwerksversorgung die Lage von Netztrennstellen notwendig. In Tabelle 4 sind die bei der Netzerstellung berücksichtigten Netztrennstellen mit zugehöriger Kilometrierung aufgeführt.

<b>Nr.</b>	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5
<b>Kilometrierung</b>	918	21090	22070	2525	4105
<b>Nr.</b>	RT6	RT7	RT8	RT9	RT10
<b>Kilometrierung</b>	10050	12350	5797	7655	4705

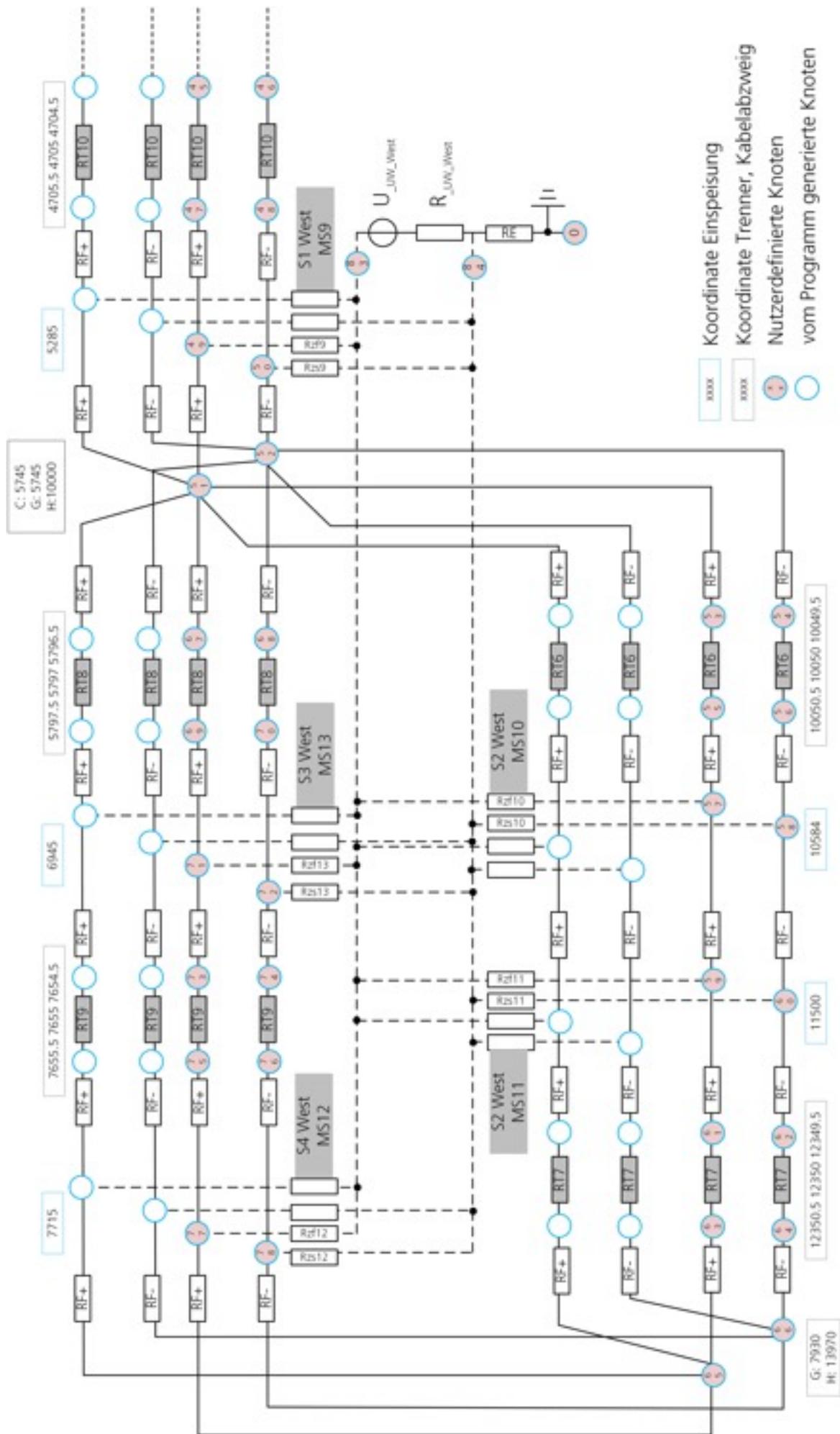
Teil B (II), Tabelle 4: Netztrennstellen im Netz der Barnimer Busgesellschaft mbH

### Querverbinder

Die genaue Lage der vorhandenen Querverbinder konnte nicht ermittelt werden. Bei der Modellierung des elektrischen Netzes wurde daher von 500 m Abstand der Querverbinder untereinander ausgegangen.

### Resultierendes elektrisches Netz

Zur Veranschaulichung der Netzmodellierung zeigt Abbildung 3 beispielhaft den Teilbereich des elektrischen Netzes, welcher durch das UW West versorgt wird. Der modellierte Bereich besteht aus dem Unterwerk, 5 Einspeisestellen S1...S5 (Mastschalter MS9...13), Zuleitungen und 4 Fahrleitungsabschnitten, die untereinander durch 5 Netztrennstellen elektrisch isoliert sind.



Teil B (II), Abb. 3: Ausschnitt des erstellten elektrischen Netzes (Teilbereich Unterwerk West)

### Elektrische Widerstände

Die Zuleitungen zwischen den Unterwerken und den Einspeisepunkten sind erdverlegt und mit 500 mm<sup>2</sup> Kabelquerschnitt ausgeführt. Das Kabelmaterial konnte nicht recherchiert werden, daher wurde hierbei von Kupfer ausgegangen. Mit dem spezifischen elektrischen Widerstand des Materials von (20 °C) und dem linearen Widerstandstemperaturkoeffizienten von ergibt sich für das erdverlegte Kabel (10 °C) ein spezifischer elektrischer Widerstand von . Mit den Längen der Zuleitungen nach Tabelle 4 können deren Leitungswiderstände (vgl. Rzfx und Rzsx in Abbildung 3) berechnet werden. Dabei wird für Hin- und Rückleiter vom gleichen Wert ausgegangen.

Für den spezifischen elektrischen Widerstand eines Fahrdrahtes existieren in der Literatur sehr viele und teilweise voneinander abweichende Angaben. Neben dem eingesetzten Profil und Querschnitt des Fahrdrahtes beeinflussen Parameter wie der Abnutzungsgrad und die Umgebungstemperatur diesen Wert im Einzelfall beträchtlich. Für die hier durchgeführte Netzberechnung war bekannt, dass Fahrdrähte vom Typ BRI 100 eingesetzt werden. Nach [KIE 98] wurde für die Berechnungen für alle Fahrleitungsabschnitte (vgl. Rf+ und Rf- in Abbildung 3) ein spezifischer elektrischer Widerstand von 0,179 Ω/ km angenommen. Dabei wird für Hin- und Rückleiter, abweichend von der Berechnung eines Stadtbahnbetriebs, vom gleichen Wert ausgegangen.

## 1.2.2 Beschreibung der Simulationsrechnung – Netzberechnung

### Fahrplanszenarien

Eine möglichst realitätsnahe Abbildung des Fahrbetriebs und der zu ermittelnden Kennzahlen kann nicht auf der Basis eines einzigen Ausschnittes aus dem gesamten Jahresfahrplan erfolgen. Um dennoch den Aufwand zu simulierender Szenarien auf ein vertretbares Maß zu begrenzen, wurden nach eingehender Analyse des Fahrplanes zwei Szenarien ausgewählt. Durch eine entsprechende Wichtung der ermittelten energetischen Kennzahlen erfolgt innerhalb der Auswertung der Simulationsergebnisse eine Abschätzung der zu erwartenden Kennzahlen bei Betrachtung des Jahresmittels.

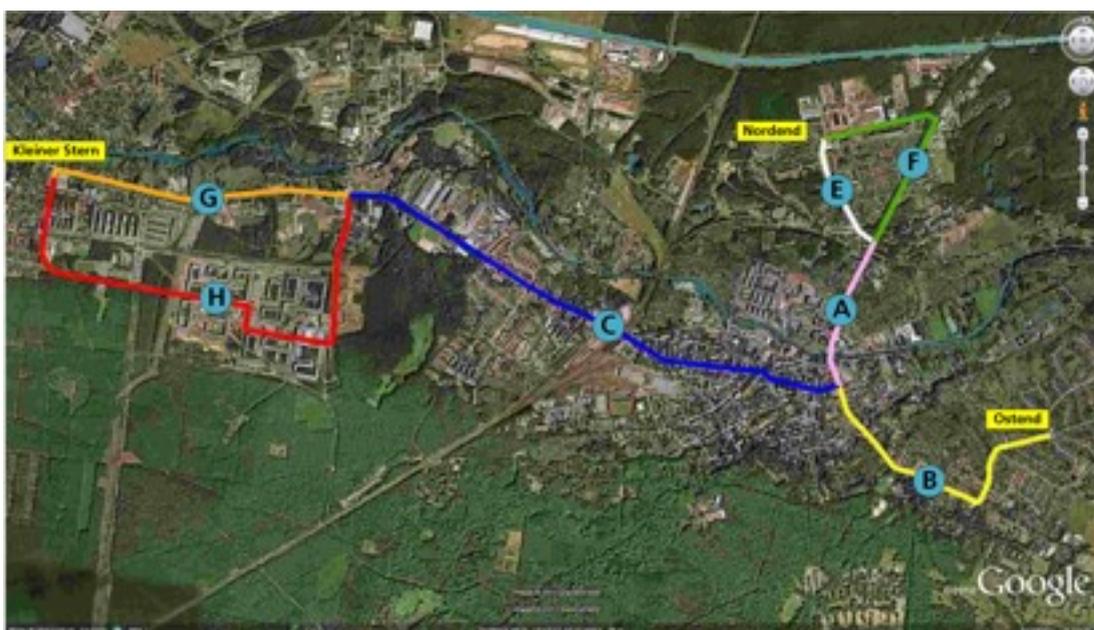
Die zwei ausgewählten Fahrplanszenarien werden in der Folge mit „Werksverkehr“ (Szenario 1) beziehungsweise „Wochenendverkehr“ (Szenario 2) bezeichnet. Tabelle 5 enthält eine Beschreibung der beiden ausgewählten Ausschnitte des Gesamtfahrplans.

Linie	Abfahrtszeiten			
	861 Hin	861 Rück	862 Hin	862 Rück
Szenario 1	07:00	07:00	07:06	07:03
	07:12	07:12	07:18	07:15
	07:24	07:24	07:30	07:27
Szenario 2	09:30	09:24	09:15	09:15
	10:00	09:54	09:45	09:45
	10:30	10:24	10:15	10:15

Teil B (II), Tabelle 5: ausgewählte Ausschnitte des Fahrplans (Fahrplanszenarien)

Die beiden ausgewählten Szenarien unterscheiden sich also nicht in der Zugfolge, sondern lediglich durch die Abstände zweier aufeinanderfolgender Abfahrten. Zur Veranschaulichung der gewählten Fahrscenarien ist das Streckennetz mit den definierten 7 Streckenabschnitten in Abbildung 4 als Satellitenaufnahme (Quelle Google Earth) dargestellt. Bei den Szenarien „Werksverkehr“ und „Wochenendverkehr“ fahren jeweils 3 Fahrzeuge mit den Abfahrtszeiten nach Tabelle 5 auf den Teilstücken:

- 861 Hin: E-A-C-G
- 861 Rück: H-C-A-F
- 862 Hin: B-C-H
- 862 Rück: G-C-B



Teil B (II), Abb. 4: Definierte Streckenabschnitte über dem Fahrweg der Linien 861 und 862 der Barnimer Busgesellschaft mbH  
Quelle: Google maps

Für die Mittelwertbildung aus den durch Simulation gewonnenen Kennzahlen werden für das Szenario „Werksverkehr“ 65 % und für das Szenario „Wochenendverkehr“ 35 % Anteil am Gesamtfahrplan unterstellt.

Zur Wiedergabe des Gesamtfahrbetriebes in einem Jahr muss darüber hinaus der mit der Umgebungstemperatur ansteigende Bedarf an Hilfsenergie für die Heizung des Fahrgastinnenraumes beachtet werden. Hierfür werden beide Fahrscenarien jeweils mit unterschiedlicher kontinuierlicher Hilfsbetriebeleistung der Fahrzeuge nach Tabelle 1 berechnet und mit der unterstellten Wichtung 42 Wochen Sommer- zu 10 Wochen Winterbetrieb gemittelt.

Die Wichtung wurde durch Auswertung des Jahresgangs der Tiefsttemperaturen am Tag für die Stadt Eberswalde im Jahr 2010 abgeleitet (Quelle [www.wetter-online.de](http://www.wetter-online.de)). Dem Winterbetrieb werden dabei Tagestiefsttemperaturen unter 0 °C zugeordnet.

Alle Berechnungen werden zunächst ohne den Einsatz stationärer Energiespeicher durchgeführt. Die hierbei ermittelten Energieverbrauchswerte stellen den Istzustand im Netz der Barnimer Busgesellschaft mbH dar. In einem zweiten Schritt wurde den drei Unterwerken

als Parallelschaltung jeweils ein Energiespeicher zugeordnet, mit dem überschüssige Bremsenergie vollständig eingespeichert und dem Fahrbetrieb wieder zugeführt wird.

Der Einspeicherung von Bremsenergie in die stationären Energiespeicher geht dabei, physikalisch bedingt, sowohl die Versorgung von Hilfsbetrieben des bremsenden Fahrzeuges aus gleichzeitig anfallender Bremsenergie des gleichen Fahrzeuges als auch, zum größten Teil, der Energieaustausch zwischen bremsenden und beschleunigenden Fahrzeugen im Unterwerksbereich voraus.

### 1.3 Ergebnisse der Netzberechnung

Die Darstellung der Berechnungsergebnisse erfolgt im Weiteren sowohl einzeln für die drei Unterwerksbereiche als auch für das Gesamtnetz.

#### 1.3.1 Kennzahlen des Fahrbetriebs

Für eine Bewertung der Berechnungsergebnisse und insbesondere im Hinblick auf die Abschätzung der Sinnfälligkeit eines Einsatzes stationärer Energiespeicher sind Besonderheiten des Fahrbetriebs, welche aus der Strecken- und Fahrplangestaltung resultieren, zu beachten. Tabelle 6 enthält die entsprechenden Kennzahlen für die beiden untersuchten Fahrplanszenarien für die drei Unterwerksbereiche und das Gesamtnetz.

			UW Ost	UW Mitte	UW West	Netz
	Länge Fahrleitung	[km]	10,3	4,4	14,4	29,1
Szenario 1	Kilometerleistung	[km]	24,1	19,5	34,8	78,4
	Zeit im UW-Bereich	[min]	87,0	67,2	86,9	241,1
	Geschwindigkeit	[km/h]	16,7	17,4	24,0	19,5
Szenario 2	Kilometerleistung	[km]	31,3	26,2	45,7	103,2
	Zeit im UW-Bereich	[min]	100,4	87,1	103,4	290,9
	Geschwindigkeit	[km/h]	18,7	18,0	26,5	21,3

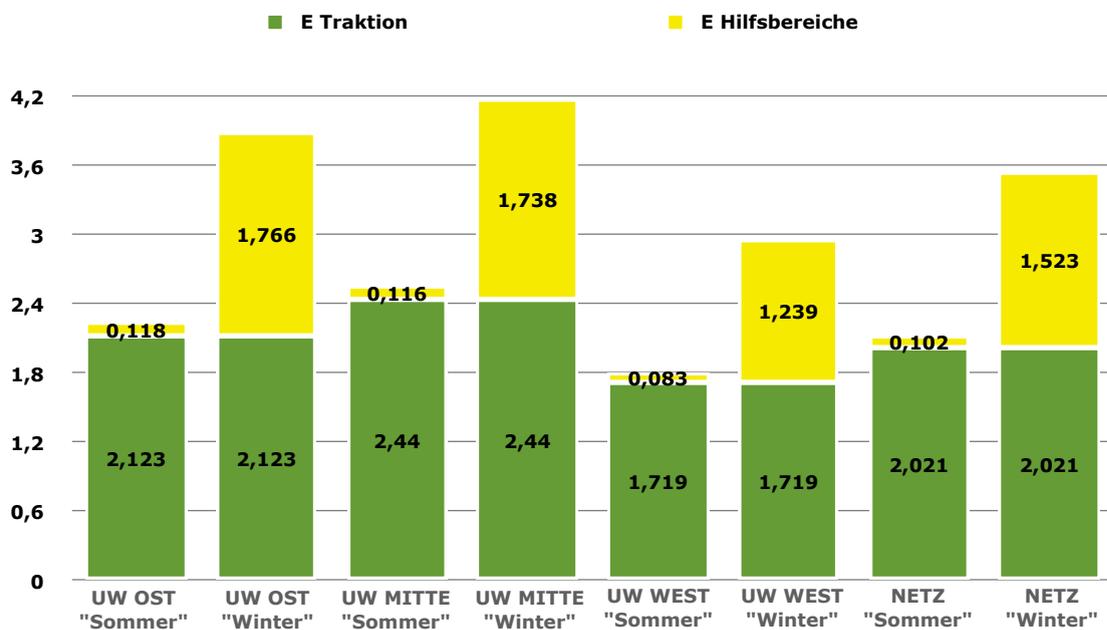
Teil B (II), Tabelle 6: Kennzahlen des Fahrbetriebs (getrennt nach UW-Bereichen und für das Gesamtnetz)

Es fällt auf, dass im Bereich des UW West ein verhältnismäßig hoher Anteil der Gesamtfahrleistung erbracht wird. Dies ist mit dem hohen Anteil der in diesem Netzabschnitt verlegten Fahrleitung zum Gesamtnetz erklärbar. Weiterhin markant sind die wesentlich höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten, welche die Fahrzeuge in diesem Netzabschnitt erreichen. Letzteres resultiert vornehmlich aus den vergleichsweise großen Haltestellenabständen auf diesem Streckenteil. In Abbildung 1 ist das Geschwindigkeitsprofil der Fahrzeuge im Bereich des UW West ab etwa 4700 m für die Linie 861 Hin und ab etwa 5000 m für die Linie 862 Hin dargestellt.

Die höheren durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeiten beim Fahrplanszenario „Wochenendverkehr“ resultieren aus wesentlich geringeren Fahrgastwechselzeiten gegenüber dem Fahrplanszenario „Werksverkehr“. Diesem Umstand wird auch durch den Fahrplan Rechnung getragen.

### 1.3.2 Energiebedarf

Der Energiebedarf eines Fahrzeuges setzt sich zusammen aus der Energie für den Vortrieb des Fahrzeuges und der Energie zum Betrieb seiner Hilfsaggregate. Während im Sommerbetrieb bei den hier untersuchten Fahrzeugen ohne Fahrgastraumklimatisierung ein sehr geringer Energiebedarf für die Hilfsbetriebe (Hydraulik, Pneumatik, Bordnetz-Elektrik) besteht, kann dieser, jeweils verglichen mit dem Gesamtenergiebedarf des Fahrzeuges, eine signifikante Größenordnung erreichen, wenn im Winterbetrieb die Fahrgastraumheizung betrieben werden muss.



Teil B (II), Abbildung 5: spezifischer Energiebedarf Sommer/Winter (getrennt nach UW-Bereichen und für das Gesamtnetz)

Abbildung 5 stellt die ermittelten Energiebedarfskennwerte, getrennt nach Sommer- und Winterbetrieb dar. Auf eine explizite Untersuchung der Energiebedarfszahlen beider Fahrscenarien wurde verzichtet, da durch andere Fahrzeuge im Netz keine wesentliche Beeinflussung dieser Werte erwartet wird.

Erkenntnisse:

- Während der Streckenteil, welcher durch das Unterwerk West mit elektrischer Energie versorgt wird, durch einen unterdurchschnittlichen Traktionsenergiebedarf gekennzeichnet ist, benötigen die Fahrzeuge im Unterwerksbereich Mitte verhältnismäßig viel Energie für die Erfüllung der Traktionsaufgabe. Als Ursache hierfür wird hauptsächlich die unterschiedliche Dichte planmäßiger und verkehrsbedingter Bremsprozesse zwischen dem innerstädtischen Bereich des UW „Mitte“ und dem Bereich des UW „West“ mit eher außerstädtischem Fahrprofil vermutet.
- Die wesentlichen Unterschiede bezüglich der mittleren Geschwindigkeiten in den Unterwerksbereichen (vgl. Tabelle 6) bedingen gleichzeitig einen unterschiedlichen spezifischen Energiebedarf zur Versorgung der Hilfsbetriebe.

Die Fahrgastraumheizung im Winterbetrieb verursacht einen deutlichen Anstieg des Fahrzeugenergiebedarfs. Liegt der Anteil der Hilfsbetriebe am Gesamtenergiebedarf im Sommer bei unter 5%, erreicht dieser bei tiefen Umgebungstemperaturen im Mittel etwa 43%.

### 1.3.3 Energiebezug (ohne stationäre Energiespeicherung)

Der Energiebedarf der Fahrzeuge wird im Wesentlichen durch den Energiebezug aus den Unterwerken gedeckt. Hierbei entstehen Übertragungsverluste infolge von Leitungswiderständen in den Unterwerken selbst, deren erdverlegten Zuleitungen zu den Einspeisestellen und in den Fahrleitungen.

Während die Verluste in den Unterwerken und den Zuleitungen stromabhängig sind, werden die Stromwärmeverluste in den Fahrleitungen zusätzlich durch den jeweiligen Abstand des Fahrzeuges zur Einspeisestelle beeinflusst. Die beschriebenen Verluste müssen, zusätzlich zum Energiebedarf der Fahrzeuge, durch die Unterwerke in das Oberleitungsnetz eingespeist werden, wodurch sich der Energiebezug aus den Unterwerken erhöht.

Ein kleinerer Anteil des Gesamtenergiebedarfs der Fahrzeuge wird durch einen Energieaustausch zwischen bremsenden Fahrzeugen und energiebeziehenden Fahrzeugen abgedeckt. Voraussetzung für diese netzinterne Nutzung von Bremsenergie ist, das im selben Unterwerksbereich zumindest ein Fahrzeug einen negativen Leistungsbezug aufweist, sich also in einem Bremsprozess befindet, und gleichzeitig mindestens ein weiteres Fahrzeug einen positiven Leistungsbezug hat, also beschleunigt oder eine streckentopographisch bedingte Höhendifferenz ausgleicht.

Ohne Kenntnis der tatsächlich in den Fahrzeugen realisierten Steuerung zur Regelung von Leistungsflüssen in Bremsphasen wurde für die Berechnungen unterstellt, das die auf einem Fahrzeug anfallende Bremsleistung zunächst für die Versorgung von Hilfsbetrieben auf dem Fahrzeug verwendet, dann im Netz auftretender Leistungsbedarf durch andere Fahrzeuge befriedigt und darüber hinaus auftretende, überschüssige Bremsenergie auf dem Bremswiderstand des Fahrzeuges in Wärme gewandelt wird.

		UW OST		UW MITTE		UW WEST		NETZ	
<b>S Z E N A R I O</b>	Energiebedarf	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>
	Traktion [kWh/km]	2,132	2,132	2,440	2,440	1,719	1,719	2,021	2,021
	Hilfsbereiche [kWh/km]	0,118	1,766	0,116	1,738	0,083	1,239	0,102	1,523
	Netzverluste [kWh/km]	0,026	0,065	0,227	0,311	0,114	0,130	0,115	0,155
	Energiebezug	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>
	Unterwerk [kWh/km]	1,819	3,039	2,410	3,623	1,673	2,565	1,902	2,974
	Netzbremung [kWh/km]	0,300	0,304	0,361	0,359	0,193	0,184	0,266	0,265
	Bremung NV [kWh/km]	0,157	0,621	0,011	0,507	0,049	0,337	0,069	0,461
		UW OST		UW MITTE		UW WEST		NETZ	
<b>S Z E N A R I O</b>	Energiebedarf	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>
	Traktion [kWh/km]	2,132	2,132	2,440	2,440	1,719	1,719	2,021	2,021
	Hilfsbereiche [kWh/km]	0,107	1,602	0,111	1,665	0,075	1,131	0,094	1,409
	Netzverluste [kWh/km]	0,048	0,108	0,282	0,390	0,156	0,213	0,155	0,226
	Energiebezug	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>
	Unterwerk [kWh/km]	1,948	3,124	2,648	3,798	1,835	2,736	2,076	3,123
	Netzbremung [kWh/km]	0,255	0,266	0,134	0,161	0,087	0,091	0,150	0,162
	Bremung NV [kWh/km]	0,084	0,453	0,051	0,536	0,028	0,235	0,045	0,372

Teil B (II), Tabelle 7: spezifischer Energiebedarf und Energiebezug ohne stationäre Energiespeicherung

Tabelle 7 stellt den ermittelten Energiebedarfszahlen die berechneten Größen zum Energiebezug, also zur Befriedigung des Fahrzeugenergiebedarfs, für die zwei untersuchten Fahrplanszenarien und getrennt nach „Sommer“ (SO) und „Winter“ (WI) gegenüber. Hierbei wurden die ermittelten Netzverluste dem Energiebedarf zugeordnet. Unter Netzbremmung wird die Abgabe von Bremsenergie an andere Fahrzeuge und unter Hilfsbetriebsbremsung die Befriedigung von Hilfsenergiebedarf aus Bremsenergie auf dem bremsenden Fahrzeug verstanden.

Erkenntnisse:

- Die beim Szenario 2 „Wochenendverkehr“ erzielten höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten bedingen einen geringeren Hilfsenergiebedarf. Gleichzeitig sinkt hierdurch jedoch auch der spezifische Wert der Hilfsbetriebsbremsung.
- Die weniger dichte Fahrzeugfolge des Szenarios 2 bewirkt eine verminderte Möglichkeit zur Netzbremmung, also zur Abgabe von Bremsenergie an andere Fahrzeuge im gleichen Unterwerksbereich.
- Es wurde für das Szenario 2 sowohl im „Sommer“- als auch im „Winter“- Betrieb ein höherer spezifischer Energiebezug ab Unterwerk ermittelt, als für das Szenario 1 „Werksverkehr“.

Aus den ermittelten Kennzahlen kann, unter Berücksichtigung der dargestellten Wichtungsfaktoren zwischen den beiden Fahrplanszenarien und für Sommer/Winterbetrieb die spezifische Bruttoenergieaufnahme, die spezifische Netzbremmung und aus beiden Zahlen die spezifische Nettoenergieaufnahme am Stromabnehmer als Durchschnittswerte für den Betrieb der Fahrzeuge über das Jahr im Gesamtnetz berechnet werden.

Hierdurch kann ein Rückschluss bezüglich der Genauigkeit der Simulationsergebnisse und der getroffenen Annahmen und Randbedingungen erfolgen. Als Vergleichsgrundlage standen hierfür die entsprechenden Werte eines Fahrzeuges der Barnimer Busgesellschaft mbH zur Verfügung, die an diesem im Fahrbetrieb auf etwa 780 Tkm gewonnen wurden (Quelle Barnimer Busgesellschaft mbH). Tabelle 8 stellt die Simulationsergebnisse den Werten aus dem Praxiseinsatz gegenüber.

		<b>Simulationsergebnisse</b>	<b>Fahrzeugdaten</b>
<b>Energieaufnahme (brutto)</b>	[kWh/km]	2,256	2,209
<b>Netzbremmung</b>	[kWh/km]	0,226	0,227
<b>Energieaufnahme (effektiv)</b>	[kWh/km]	2,030	1,982

Teil B (II), Tabelle 8: Fahrzeugenergie (Simulation und Messdaten)

Der durchschnittliche Energiebedarf der Fahrzeuge wurde in den Simulationsrechnungen etwa 2 % höher angesetzt als der Erwartungswert aus dem Praxiseinsatz. Dies wird als zufriedenstellende Annäherung bewertet. Zum Vergleich: bei den ermittelten Durchschnittsgeschwindigkeiten von etwa 20 km/h führt ein um 1 kW erhöhter Hilfsenergiebedarf zur Erhöhung des spezifischen Energiebedarfs um 50 Wh/km.

### 1.3.4 Energiebezug (mit stationärer Energiespeicherung)

Das Ziel der Simulationsrechnungen bestand in der Ermittlung des Potentials zur Absenkung der Unterwerkseinspeisung. Dies soll erreicht werden, indem mittels stationärer Energiespeicher bisher ungenutzte Bremsenergie in Phasen, in denen im Unterwerksabschnitt ein Leistungsüberschuss besteht, eingespeichert und in Phasen, in denen im Unterwerksabschnitt Leistungsbedarf besteht, dem Fahrprozess wieder zugeführt wird.

Für die Simulationsrechnungen wurde hierfür jedem Unterwerk ein stationärer Energiespeicher als Parallelschaltung an der Sammelschiene des Unterwerks zugeordnet. Die Steuerung des stationären Energiespeichers erfolgt durch Auswertung der Unterwerksspannung.

Steigt diese infolge von Bremsprozessen eines einzelnen oder mehrerer Fahrzeuge über dessen Leerlaufspannung an, wird mittels des Energiespeichers anfallende Energie möglichst vollständig, jedoch vermindert um die Übertragungsverluste im Netz, eingespeichert. In Phasen des Fahrbetriebs, in denen infolge von Beschleunigungen und/oder von Hilfsbetrieben eines oder mehrerer Fahrzeuge ein Leistungsbedarf im Unterwerksbereich besteht, sinkt die Unterwerksspannung unter dessen Leerlaufspannung.

Nunmehr wird der zugeordnete Energiespeicher anteilig an der Befriedigung des Leistungsbedarfs im Unterwerksbereich beteiligt, wodurch insgesamt die aus dem Unterwerk bezogene Energiemenge, im Vergleich zu einem Fahrbetrieb ohne Energiespeichereinsatz, abgesenkt wird. Aus dem Energiespeicher wird dem Fahrbetrieb im Berechnungszeitraum so viel Energie zugeführt, wie in Phasen von Leistungsüberschuss aufgenommen wird, vermindert um den Betrag innerer Energiespeicherverluste.

Auf die inneren Speicherverluste wird bei der Dimensionierung des stationären Energiespeichersystems näher eingegangen. Die gewählte Strategie zur Nutzung überschüssiger Bremsenergie durch die beschriebene Energiespeicherbeteiligung bedingt die Notwendigkeit einer iterativen Annäherung innerhalb der Simulationsarbeiten.

			UW OST		UW MITTE		UW WEST		NETZ	
<b>S Z E N A R I O</b>	Energiebedarf		<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>
	aus UW ohne ES	[kWh/km]	1,819	3,039	2,410	3,623	1,673	2,565	1,902	2,974
	aus ES	[kWh/km]	0,784	0,409	0,976	0,481	0,679	0,329	0,786	0,392
	aus UW mit ES	[kWh/km]	1,034	2,629	1,434	3,142	0,994	2,236	1,116	2,583
	Absenkung Energiebezug UW		<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>
<b>1</b>		%	43,1	13,5	40,5	13,3	40,6	12,8	41,3	13,2
			UW OST		UW MITTE		UW WEST		NETZ	
<b>S Z E N A R I O</b>	Energiebedarf		<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>
	Traktion	[kWh/km]	1,948	3,124	2,648	3,798	1,835	2,736	2,076	3,123
	Hilfsbereiche	[kWh/km]	0,902	0,557	1,109	0,640	0,794	0,461	0,907	0,536
	Netzverluste	[kWh/km]	1,046	2,567	1,539	3,157	1,042	2,775	1,169	2,587
	Absenkung Energiebezug UW		<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>	<b>SO</b>	<b>WI</b>
<b>2</b>	Unterwerk	%	46,3	17,8	41,9	16,9	43,2	16,9	43,7	17,2

Teil B (II), Tabelle 9: ermitteltes Energiesparpotential durch den Einsatz stationärer Energiespeicher

Tabelle 9 enthält die ermittelten spezifischen Werte für die Energiebezüge aus den Unterwerken und stationären Energiespeicher und als Mittelwerte für das Gesamtnetz, für die untersuchten Fahrplanszenarien im Sommer- und Winterbetrieb und im Vergleich ohne und mit Energiespeichereinsatz.

Erkenntnisse:

- Durch den Einsatz stationärer Energiespeicher sinkt der Gesamtenergiebezug (Summe der Energiebezüge aus Speicher und Unterwerk) geringfügig. Dies wird, ohne nähere Untersuchung, auf verringerte Verluste zurückgeführt.
- Der Einsatz stationärer Energiespeicher bewirkt im Sommerbetrieb eine deutlich höhere Absenkung des Unterwerksbezuges. Ursache hierfür ist der kleinere Anteil ungenutzter Bremsenergie der Fahrzeuge im Winterbetrieb infolge des erhöhten Hilfsenergiebedarfs.
- Beim untersuchten Fahrplanszenario „Wochenendverkehr“ besteht gegenüber dem Fahrplanszenario „Werksverkehr“ ein erhöhtes Potential zur Rückgewinnung ungenutzter Bremsenergie, vornehmlich infolge der geringeren Fahrzeugdichte und der dadurch verminderten Möglichkeit zur Netzbremung.

### 1.3.5 Energiesparpotential durch stationäre Energiespeicherung

Die Absenkung des Energiebezugs aus den Unterwerken ist für den Betreiber eines elektrischen Fahrbetriebs die Entscheidungsgröße zur realistischen Einschätzung von Maßnahmen, die auf eine Steigerung der Energieeffizienz abzielen. Dabei ist vornehmlich das Betriebsergebnis als Jahresmittelwert eine Entscheidungshilfe für strategische Entscheidungen.

Tabelle 10 fasst die ermittelten Energiesparpotentiale für den Fahrbetrieb, die beim Einsatz stationärer Energiespeichersysteme als Ergänzung der bestehenden Unterwerksversorgung erwartet werden können, als Jahresmittelwerte zusammen. Dabei wurden wiederum die dargestellten Wichtungsfaktoren zwischen den beiden untersuchten Fahrplanszenarien sowie zwischen „Sommer“- und „Winter“-Betrieb zugrunde gelegt.

			UW OST	UW MITTE	UW WEST	NETZ
<b>Jahresmittel</b>	Energiebezug UW ohne ES	kWh/km	2,096	2,722	1,902	2,167
	Energiebezug ES	kWh/km	0,740	0,893	0,638	0,733
	Energiebezug UW mit ES	kWh/km	1,340	1,793	1,249	1,413
	Absenkung Energiebezug UW	%	<b>36,0</b>	<b>34,1</b>	<b>34,3</b>	<b>34,8</b>

Teil B (II), Tabelle 10: spezifischer Energiesparpotential durch den Einsatz stationärer Energiespeicher (Jahresmittel)

Es ist anzumerken, dass innerhalb der Simulationsarbeiten nur kleine Fahrplanausschnitte (vgl. Tabelle 6) und jeweils der reine Fahrbetrieb betrachtet wurden. Verschiebungen des spezifischen Unterwerksbezuges, die sich im realen Fahrbetrieb beispielsweise durch

- den Energiebedarf für den Betrieb von Hilfsbetrieben der Fahrzeuge während des Aufenthaltes im Fahrzeugdepot, an Endhaltestellen und während Auf- und Abrüstzeiten,
- den Einfluss des unterschiedlichen Höhenprofils auf Hin- und Rückstrecken, der innerhalb der Simulationsarbeiten nur durch einen unverhältnismäßig großen Betrachtungszeitraum eliminiert werden kann,
- den Einfluss der Umgebungstemperatur auf den spezifischen elektrischen Widerstand der Einspeisekabel und Fahrleitungsdrähte und
- den Energiebedarf zum Betrieb von Hilfsanlagen des Energieversorgungsnetzes, insbesondere in den Unterwerken

ergeben können, wurden innerhalb der Simulationsarbeiten nicht erfasst.

Mit den Randbedingungen eines durchschnittlichen jährlichen Fahrbetriebes von 48 Wochen auf jeder Linie, der Erfassung von nur „vollständigen“ Umläufen des Fahrplans, einer 70%/30% Mittelung zwischen Schul- und Ferienbetrieb (MO-FR) und 18 ct/kWh Energiebezugspreis erfolgte die Abschätzung des monetären Einsparpotentials nach Tabelle 11.

			Anteil UW OST	Anteil UW MITTE	Anteil UW WEST
	861 Hin	[km]	2,525	2,180	3,215
	861 Rück	[km]	3,440	2,180	5,010
	862 Hin	[km]	2,700	2,180	5,140
	862 Rück	[km]	2,700	2,180	3,225
Fahrten "Jahr"	861 Hin	[-]	18528		
	861 Rück	[-]	18528		
	862 Hin	[-]	17472		
	862 Rück	[-]	17232		
	Kilometerleistung	[km]	204220	156437	297772
	Potential	[kWh/km]	0,755	0,929	0,653
	Potential monetär	[T€Jahr]	27,8	26,2	35,0

Teil B (II), Tabelle 11: Energiesparpotential (monetär) durch den Einsatz stationärer Energiespeicher (Jahresmittel)

## 2. Dimensionierung der stationären Energiespeichersysteme auf der Basis von Superkondensatoren

Für die Erfüllung des Betriebsziels wird ein Superkondensatorspeichersystem vorgesehen, mit welchem in Bremsphasen überschüssige Bremsenergie möglichst vollständig zwischengespeichert und bei nachfolgender Leistungsanforderung ins Fahrleitungsnetz abgegeben werden kann.

### 2.1 Datenbasis

Tabelle 12 enthält Daten des für die untersuchten Speicherkonfigurationen zugrunde gelegten Superkondensator-Einzelzelltyps. Eine Speicherkonfiguration besteht dabei immer aus einer Anzahl parallel verschalteter Einzelstränge, die durch die serielle Verschaltung von Einzelzellen oder deren Zusammenfassung in vorkonfektionierten Modulen gebildet werden.

Der DC/DC- Steller für den Superkondensatorspeicher soll zur Vereinfachung des notwendigen leistungselektronischen Aufwandes als bidirektionaler Hochsetzsteller ausgeführt werden. Das heißt, dass die obere Betriebsspannung des Energiespeichersystems jeweils unterhalb der minimalen Fahrzeugspannung liegen muss. Unter Annahme der während der Simulationsläufe beobachteten minimalen Energiespeicherklemmenspannung von 620 V und Beachtung einer Regelreserve von 20 V für den Gleichstromsteller ergeben sich 600 V als obere Arbeitsspannung für einen Einzelstrang und folglich für das gesamte Speichersystem.

Hersteller	Maxwell
Zelltyp	BCAP3000 P270
nominale Spannung	2,7 V
Innenwiderstand (DC)	0,29 mΩ
nominale Kapazität	3000 F
Durchmesser	60,7 mm
Länge	145 mm
Gewicht	0,55 kg

Teil B (II), Tabelle 12: Daten eines verfügbaren Superkondensator-Einzelzellentyps

Aus Lebensdauergründen wird als obere Einzelzellspannung 2,5 V angenommen. Somit ergibt sich ein Einzelstrang aus 240 Einzelzellen. Bei Ansatz einer unteren Entladetiefe von 1.0 V können ca. 72 % des theoretischen Energieinhaltes einer Zelle ausgenutzt werden  $(2.5V^2 - 1.0V^2) / (2.7V^2)$ . In diesem Fall hat der Einzelstrang einen Betriebsbereich von 240...600 V, einen Nutzenergieinhalt von 0,525 kWh und ein Einzelzellgewicht von 132 kg.

### 2.2 Vorgabe eines Speicherzyklus

Für eine Abschätzung der benötigten Energiespeicherkonfiguration zur Erfüllung des Betriebsziels wird ein Speicherzyklus benötigt, der jeweils möglichst die Maximalanforderung im Fahrleitungsabschnitt und im Jahresgang repräsentiert.

Aus den Kennzahlen des Fahrbetriebes nach Tabelle 6 und den ermittelten spezifischen Beteiligungen der stationären Energiespeicher am Gesamtenergiebezug nach Tabelle 9 können mittlere Energiespeicherleistungen (Energieabgabe) gebildet werden. Tabelle 13 fasst die entsprechenden

Werte, getrennt nach den untersuchten Fahrplanszenarien und nach „Sommer“- und „Winter“-betrieb zusammen.

		UW OST		UW MITTE		UW WEST		NETZ		
S Z E N A R I O  1		SO	WI	SO	WI	SO	WI	SO	WI	
	Kilometerleistung	[km]	24,1		19,5		34,8		78,4	
	Zeit im UW-Bereich	[min]	87,0		67,2		86,9		241,1	
	Energiebezug aus ES	[kWh/km]	0,784	0,409	0,976	0,481	0,679	0,329	0,786	0,392
	mittlere Leistung ES	[kW]	13,0	6,8	17,0	8,4	16,3	7,9	15,3	7,6
S Z E N A R I O  2		SO	WI	SO	WI	SO	WI	SO	WI	
	Kilometerleistung	[km]	31,3		26,2		45,7		103,2	
	Zeit im UW-Bereich	[min]	100,4		87,1		103,4		290,9	
	Energiebezug aus ES	[kWh/km]	0,902	0,557	1,109	0,640	0,794	0,461	0,907	0,536
	mittlere Leistung ES	[kW]	<b>16,9</b>	10,4	<b>20,0</b>	11,6	<b>21,1</b>	12,2	<b>19,3</b>	11,4

Teil B (II), Tabelle 13: mittlere Leistungen der stationären Energiespeicher (Energieabgabe)

Exemplarisch ergibt sich hinsichtlich der maximalen Leistungsabgabe über der Zeit das Fahrplanszenario „Wochenendverkehr“ im „Sommer“-Betrieb für den stationären Energiespeicher am Unterwerk WEST. Den zugehörigen Speicherzyklus (Leistung über der Zeit an der Energiespeicherklemme) zeigt Abbildung 6, dabei bedeuten negative Leistungen die Einspeicherung von Leistung im Energiespeichersystem und positive Leistungen eine Leistungsabgabe durch den Speicher in den Unterwerksbereich.

Für die anderen Unterwerksabschnitte werden die Dimensionierungsergebnisse im Folgenden mit aufgeführt.

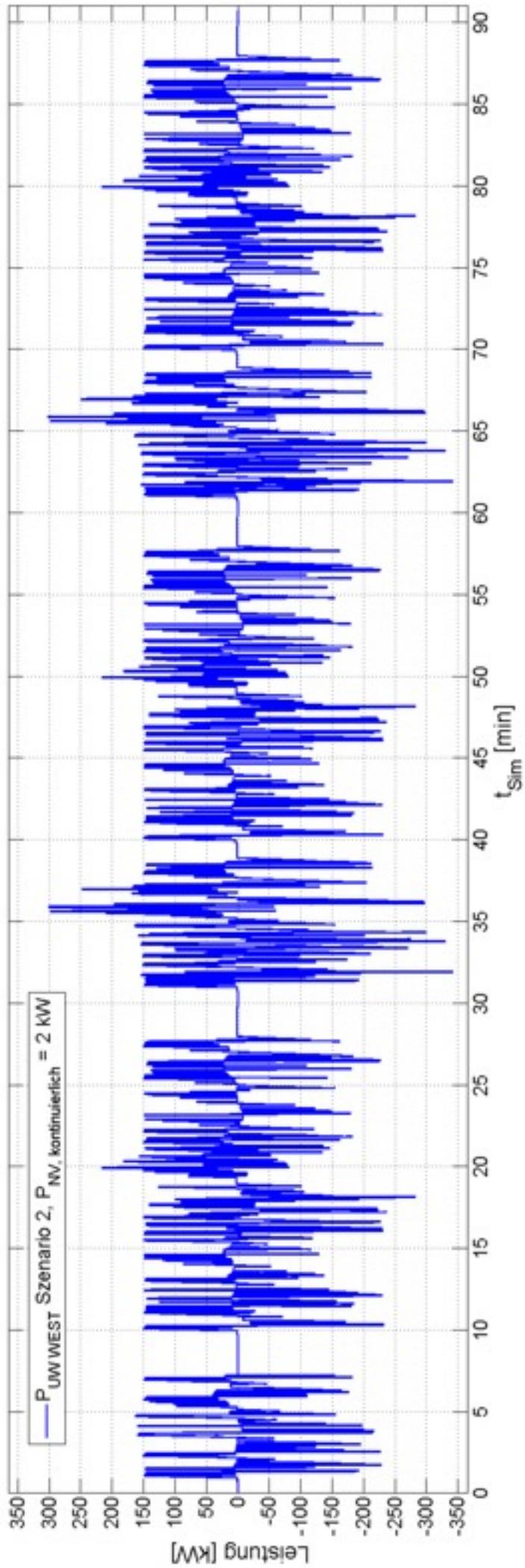
### 2.3 Beschreibung der Simulationsrechnung

Auf der Basis des ermittelten Speicherzyklus erfolgt eine Auslegung des notwendigen Energiespeichersystems hinsichtlich

- Anzahl der in Parallelschaltung anzuordnenden Superkondensatorstränge unter Einhaltung eines hinreichend hohen Gesamtwirkungsgrades für das Energiespeichersystem und
- Auslegung des Leistungsteils des Gleichstromstellers als notwendiges leistungselektronisches Stellglied zwischen der Unterwerksklemme des Energiespeichersystems und dessen Superkondensatorteil.

Da eine Änderung von Parametern des Energiespeichersystems eine direkte Auswirkung auf dessen Gesamtverhalten innerhalb der Netzsimulation bewirkt, muss der Auslegungsprozess auf iterativem Wege erfolgen.

Teil B (II), Abb. 6: Speicherzyklus an der Klemme des ES am UW WEST



Innerhalb der Berechnung werden die inneren Speicherverluste berücksichtigt, die sich aus den Verlustleistungsanteilen

- Stromwärmeverluste in der Superkondensator-Einzelzellen
- Stromwärmeverluste in den Verbindungselementen zwischen den Einzelzellen und zwischen den in Parallelschaltung angeordneten Strängen
- Schalt- und Durchgangsverluste der Hauptelemente (Leistungsschalter, Dioden, Stellan- duktivitäten, Ausgleichskondensatoren) im Leistungsteil des Gleichstromstellers und
- Leistung von Hilfsaggregaten (Kühlung, Steuerelektronik)

zusammen setzen. Die einzelnen Verlustleistungsanteile sind von einer Vielzahl an Parametern abhängig, die mit der Anordnung des Superkondensatorteils und der gewählten leistungselektronischen Ankopplung variieren.

Auf die einzelnen Parameter wird an dieser Stelle nicht eingegangen, jedoch werden die Gesamtverluste im Superkondensatorteil beziehungsweise im Leistungsteil des Gleichstromstellers innerhalb der nachfolgenden Darstellung der Berechnungsergebnisse ebenfalls ausgewiesen.

## 2.4 Berechnungsergebnisse

Mit der Anzahl der parallel verschalteten Einzelstränge erhöht sich die Gesamtkapazität des Energiespeichersystems. Bei gleichbleibendem Leistungsprofil erhöht sich das mittlere Speicher- spannungsniveau, wodurch sich die Strombelastung des Energiespeichersystems reduziert. Dies führt sowohl im Superkondensatorteil, als auch im Leistungsteil des Gleichstromstellers zu reduzierten Verlusten beim Ein- und Ausspeicherprozess. Tabelle 14 fasst die gefundenen Energie- speichergrößen (Anzahl Einzelstränge) für die drei Unterwerksabschnitte sowie die ermittelten Verlustleistungsanteile und resultierenden Speicherwirkungsgrade zusammen.

	<b>Anzahl Stränge</b>	<b>Verluste SCAP [Wh]</b>	<b>Verluste DC/DC [Wh]</b>	<b>Gesamtverluste [Wh]</b>	<b>Wirkungsgrad [%]</b>
<b>UW OST</b>	7	1327	1469	2796	91,0
<b>UW MITTE</b>	5	1372	1433	2805	91,2
<b>UW WEST</b>	6	1592	1902	3494	91,2

Teil B (II), Tabelle 14: Verlustleistungen und Wirkungsgrade für die ausgewählten Energiespeicher

Zur Ermittlung des Speicherwirkungsgrades wurden die Gesamtverluste, die bei der Belastung mit dem Speicherprofil entstehen, ins Verhältnis zum dabei durch das Energiespeichersystem ausgespeicherten Energieumsatz gesetzt.

Die Energiespeicherkonfiguration mit 6 Superkondensatorsträngen, die zueinander in Parallelschaltung angeordnet und jeweils aus 240 Einzelzellen gebildet werden, wird für den untersuchten Anwendungsfall als Energiespeicherlösung am Unterwerksabschnitt WEST als ausreichend dimensioniert angesehen. Eine weitere Vergrößerung bewirkt keine wesentliche Effizienzsteigerung des Gesamtsystems, verursacht jedoch erhöhte Anschaffungs- und Wartungskosten.



Für die ausgewählte Konfiguration des Energiespeichersystems zeigt Abbildung 7 den Verlauf der elektrischen Spannung an der Klemme des Kondensatorteils über der Zeit.

Neben einem ausreichenden Speicherwirkungsgrad bestimmt bei vorgegebenem Lastprofil die Energiespeichergröße ebenfalls die Strombelastung der Superkondensatoren über der Zeit. Diesem Aspekt muss bei der Auslegung des Energiespeichersystems vor allem aus Gründen der Lebensdauer Beachtung geschenkt werden. Abbildung 8 zeigt exemplarisch die resultierende Strombelastung des Energiespeichersystems am UW WEST. Die mittlere Strombelastung kann als unterkritisch hinsichtlich vorzeitiger Alterung der Superkondensatorzellen eingeschätzt werden.

## 2.5 Energiespeicherkosten und Amortisation

Für eine Entscheidung, ob sich die Anschaffung und der Betrieb eines Energiespeichersystems aus wirtschaftlicher Sicht darstellen lässt, muss der zu erwartende monetäre Effekt der Energieeinsparung zu den Anschaffungs- und Wartungskosten des Systems ins Verhältnis gesetzt werden. Nach Erfahrungen des Fraunhofer IVI kann der Anschaffungspreis eines hier diskutierten Superkondensator- Energiespeichersystems hinreichend genau mit 150 % des Preises für die Einzelzellen abgeschätzt werden. Die jährlichen Wartungskosten werden mit 2 % der Anschaffungskosten angesetzt.

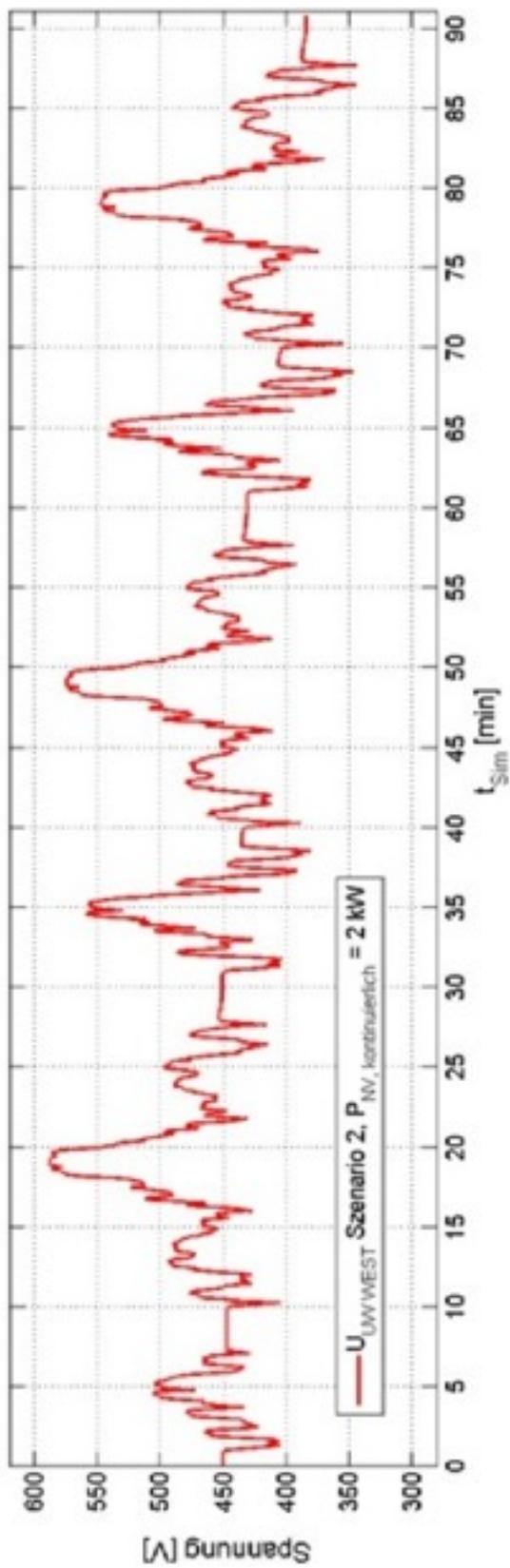
Tabelle 15 beinhaltet eine Gegenüberstellung der ermittelten monetären Einsparpotentiale (vgl. Tabelle 11) zu den abgeschätzten Anschaffungs- und Wartungskosten der Energiespeichersysteme an den drei Unterwerksabschnitten, sowie eine aus den ermittelten Werten resultierende Abschätzung der wirtschaftlichen Amortisation ohne Betrachtung kalkulatorischer Zinsen.

		<b>UW OST</b>	<b>UW MITTE</b>	<b>UW WEST</b>
<b>monetäres Potential</b>	[T€/Jahr]	27,8	26,2	35,0
<b>Anschaffungskosten</b>	[T€]	236,3	168,8	202,5
<b>Wartungskosten</b>	[T€/Jahr]	4,7	3,4	4,0
<b>Amortisationszeit</b>	[Jahre]	10,3	7,4	6,5

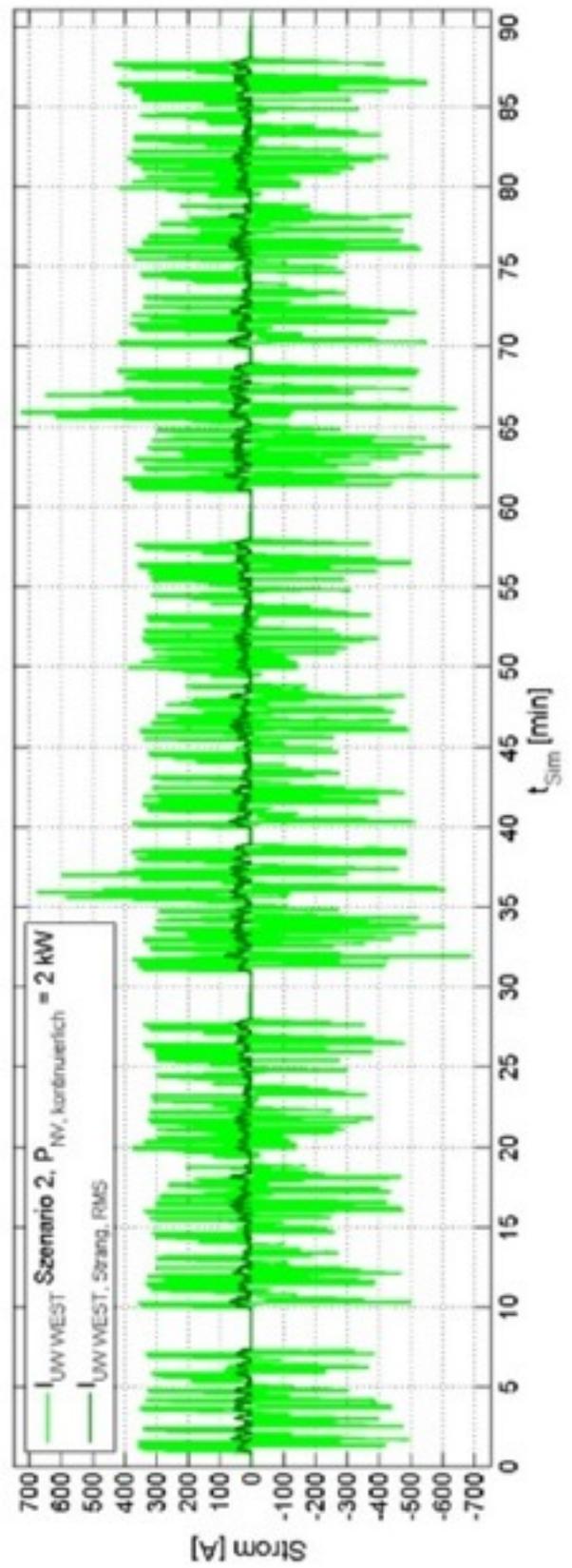
Teil B (II), Tabelle 15: Abschätzung der Amortisationszeit

Quellenangaben:

[KIE 98] KIESSLING, Friedrich; PUSCHMANN, Rainer; SCHMIEDER, Axel; SCHMIDT, Peter: Fahrleitungen elektrischer Bahnen : Planung Berechnung Ausführung. 2., überarb. Aufl. Stuttgart : B.G. Teubner, 1998. – ISBN 3-519-16177-X



Teil B (II), Abb. 7: Spannung an der Klemme des ES über der Zeit für die ausgewählte Konfiguration



Teil B (II), Abb. 8: Strombelastung des Superkondensator-Energiespeichers (Klemmstrom und RMS-Wert Einzelstrang)



# **TEIL B (III)**

## **Ergänzende Untersuchung über die Auswahl und den Einsatz eines Energiespeichers im Fahrleitungsnetz von O-Bussen**



IVI

Im Auftrag der Barnimer Busgesellschaft mbH erarbeitet durch:

**Fraunhofer-Institut  
für Verkehrs- und Infrastruktursysteme  
Zeunerstraße 38  
D - 01069 Dresden**

**Anmerkung:**

Das Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme erhob die Daten der Untersuchung (Teil B/II) zunächst für die Fahrzeuge des Herstellers MAN Typ NGE 152. Diese Fahrzeuge waren bis Juni 2012 im Einsatz in Eberswalde.

Mit der ersten Untersuchung des Fraunhofer Instituts überschneidet sich die Anschaffung von 12 Neufahrzeugen des Herstellers Solaris Typ Trollino 18 im Zeitraum von Oktober 2010 bis Juni 2012.

Die ergänzende Untersuchung (Teil B/III) befasst sich daher noch einmal gesondert mit den Gegebenheiten von Eberswalde auf der Basis von Solaris Trollino 18.

## 1. Fahrzeugsimulation und Netzberechnung

Die vorgestellten Simulationsarbeiten dienen einer Abschätzung des Potentials zur Steigerung der Energieeffizienz beim O-Bus Betrieb der Barnimer Busgesellschaft mbH (BBG) durch Einspeicherung bislang ungenutzter Bremsenergie mittels stationärer Energiespeicher.

Ist das ermittelte Potential in signifikanter Größenordnung, wird auf Grundlage dieser Abschätzung eine Auswahl geeigneter Energiespeichertechnologie sowie deren Dimensionierung zur Erschließung des vorhandenen Energiesparpotentials vorgenommen.

Das Antriebskonzept des Oberleitungsgeführten Busbetriebs basiert auf vollelektrischen Bussen sowie wegseitiger Infrastruktur für deren kontinuierliche Energieversorgung und besteht **fahrzeugseitig** aus:

- einem elektrischen Fahrmotor,
- einem Spannungszwischenkreis,
- einem elektrischen Fahrzeugbordnetz,
- einem **elektrischen Energiespeichersystem**,
- einem Bremschopper,
- einem Dachstromabnehmer,

und **wegseitig** aus

kontinuierlich über den Streckenverläufen verlegten Oberleitungssystemen zur Energieverteilung, bestehend aus:

- Hin- und Rückleiter zu den Einspeisepunkten,
- Querverbindern,
- Streckentrennern zur Trennung benachbarter Speiseabschnitte und
- Masttrennschaltern an den Einspeisepunkten.

sowie Anlagen zur Energiebereitstellung, bestehend aus:

- Unterwerken zur Energiewandlung aus dem Mittelspannungsnetz und Einspeisung in das Gleichspannungsnetz in Form von Dioden-Gleichrichtern und
- erdverlegten Zuleitungen (Hin- und Rückleiter) zu den Masttrennschaltern.

## 1.1 Randbedingungen und Annahmen der Fahrzeugsimulation

### 1.1.1 Datenbasis Fahrzeuge

Tabelle 1 enthält eine Zusammenfassung der für die Simulationsarbeiten verwendeten Fahrzeugdaten (Bereitstellung durch Auftraggeber) sowie Bemerkungen im Falle getroffener Annahmen.

Fahrzeugdaten	Einheit	Solaris	Bemerkungen
Leergewicht	t	19,9	
zulässiges Gesamtgewicht	t	28,0	
Beförderungskapazität	Pers.	143	
mittlerer Beladungszustand	-	1/4	Annahme
Nennleistung	kW	250	
Länge Wagenkasten	m	18,0	
Nenndrehzahl Motor	1/min	1370	
Maximaldrehzahl Motor	1/min	2600	
Höchstgeschwindigkeit	km/h	70	
maximale Anfahrbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>	1,3	
maximale Bremsverzögerung	m/s <sup>2</sup>	- 0,8	
Treibraddurchmesser	m	0,945	
Getriebeübersetzung	-	6,2	
Anzahl Antriebsmotoren	-	1	
Rollreibungsbeiwert der Bereifung	-	0,007	Annahme
installierte Hilfsbetriebeleistung	kW	48	Klimaanlage
Hilfsbetriebeleistung (kontinuierlich)	kW	21/30	SO/WI* (Annahme)
Spannungsniveau Bremswiderstand	V	720	
min. zulässige Fahrzeugspannung	V	480	
zulässiger Strom im Speiseabschnitt	A	1600	
<b>Daten Fahrzeugenergiespeicher</b>		<b>LS Mtron</b>	
Hersteller		LS Cable	
Zelltyp		LS3000	
max. Arbeitsspannung	V	790	Annahme
min. Arbeitsspannung	V	519	Annahme
nominale Kapazität	F	10,156	
Nutzenergieinhalt	Wh	500	
Innenwiderstand	mΩ	144	nur Einzelzellen
Gesamtgewicht	Kg	320	Abschätzung
Wirkungsgrad DC/DC-Steller	-	0,95	Abschätzung

\* SO – Sommerbetrieb    WI - Winterbetrieb

Teil B (III), Tabelle 1: Annahmen für Fahrzeugdaten

#### *Fahrzyklen*

beschrieben in [KLA 1201]

#### *Wirkungsgrad Rad-Zwischenkreis*

beschrieben in [KLA 1201]

### 1.1.2 Beschreibung der Simulationsrechnung - Fahrzeugsimulation

Auf der Basis der Fahrzeug- und Streckendaten wurde mittels bekannter Berechnungsvorschriften der Fahrdynamik der resultierende Leistungsbedarf am Antriebsrad für jedes Fahrzeug ermittelt.

Unter Ansatz eines Wirkungsgradkennfeldes für die Leistungsübertragung zwischen Antriebsachse und Fahrzeugzwischenkreis (vgl. Abschnitt 1.1.1) erfolgte die Berechnung der resultierenden elektrischen Antriebs- beziehungsweise Bremsleistungen am Spannungszwischenkreis der Fahrzeuge.

Die Berechnungsergebnisse beinhalten einen konstanten mittleren Bedarf elektrischer Hilfsbetriebe nach Tabelle 1.

## 1.2 Randbedingungen und Annahmen der Netzberechnung

### 1.2.1 Datenbasis Energieversorgung

*Kilometrierung für Simulation*  
beschrieben in [KLA 1201]

*Unterwerke und Fahrleitungsabschnitte*  
beschrieben in [KLA 1201]

*Netztrennstellen*  
beschrieben in [KLA 1201]

*Querverbinder*  
beschrieben in [KLA 1201]

*elektrische Widerstände*

Die Zuleitungen zwischen den Unterwerken und den Einspeisepunkten sind erdverlegt und aus Aluminiumkabel mit  $2 \times 500 \text{ mm}^2$  Kabelquerschnitt ausgeführt. Mit dem spezifischen elektrischen Widerstand des Materials

$0,0294 \frac{\Omega \times \text{mm}^2}{\text{m}}$  ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und dem linearen Temperaturkoeffizienten von

$0,0039 \text{ K}^{-1}$  ergibt sich für das erdverlegte Kabel ( $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ein spezifischer elektrischer Widerstand von  $28,3 \times 10^{-6} \frac{\Omega}{\text{m}}$

Die Herleitung des spezifischen elektrischen Widerstandes des Fahrdrahtes wurde beschrieben in [KLA 1201].

### 1.2.2 Beschreibung der Simulationsrechnung – Netzberechnung

*Fahrplanszenarien*

Eine möglichst realitätsnahe Abbildung des Fahrbetriebs und der zu ermittelnden Kennzahlen kann nicht auf der Basis eines einzigen Ausschnittes aus dem gesamten Jahresfahrplan erfolgen. Um dennoch den Aufwand zu simulierender Szenarien auf ein vertretbares Maß zu begrenzen, wurden nach eingehender Analyse des Fahrplanes zwei Szenarien ausge-

wählt. Durch eine entsprechende Wichtung der ermittelten energetischen Kennzahlen erfolgt innerhalb der Auswertung der Simulationsergebnisse eine Abschätzung der zu erwartenden Kennzahlen bei Betrachtung des Jahresmittels.

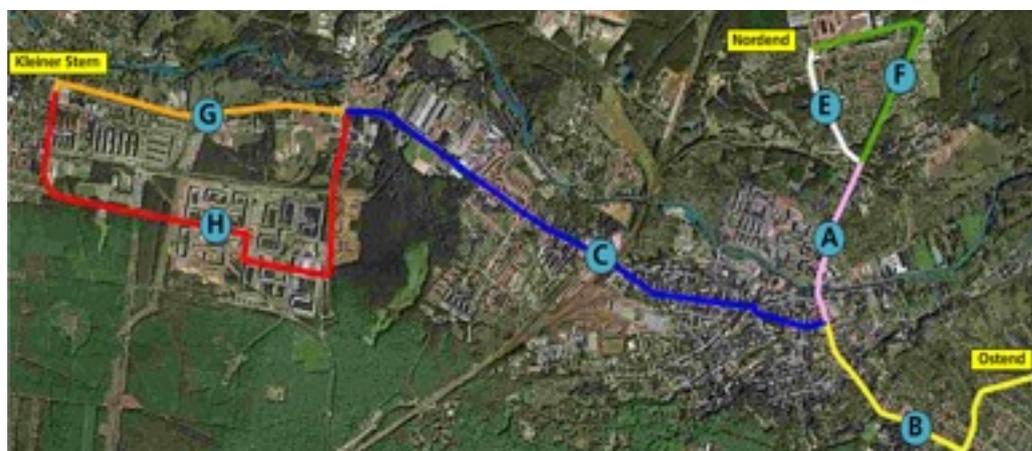
Die zwei ausgewählten Fahrplanszenarien werden in der Folge mit „Werktagsverkehr“ (Szenario 1) beziehungsweise „Wochenendverkehr“ (Szenario 2) bezeichnet. Tabelle 2 enthält eine Beschreibung der beiden ausgewählten Ausschnitte des Gesamtfahrplans.

Abfahrtszeiten				
Linie	861 Hin	861 Rück	862 Hin	862 Rück
<b>Szenario 1</b>	7:00	7:00	7:06	7:03
	7:12	7:12	7:18	7:15
	7:24	7:24	7:30	7:27
<b>Szenario 2</b>	9:30	9:24	9:15	9:15
	10:00	9:54	9:45	9:45
	10:30	10:24	10:15	10:15

Teil B (III), Tabelle 2: ausgewählte Abschnitte des Fahrplans (Fahrplanzenarien)

Die beiden ausgewählten Szenarien unterscheiden sich also nicht in der Zugfolge, sondern lediglich durch die Abstände zweier aufeinanderfolgender Abfahrten. Zur Veranschaulichung der gewählten Fahrplanzenarien ist das Streckennetz mit den definierten 7 Streckenabschnitten in Abbildung 1 als Satellitenaufnahme (Quelle Google Earth) dargestellt. Bei den Szenarien „Werktagsverkehr“ und „Wochenendverkehr“ fahren jeweils 3 Fahrzeuge mit den Abfahrtszeiten nach Tabelle 2 auf den Teilstücken:

- 861 Hin: E-A-C-G
- 861 Rück: H-C-A-F
- 862 Hin: B-C-H
- 862 Rück: G-C-B



Teil B (III), Abb. 1: definiertes Streckenabschnitte über dem Fahrweg der Linien 861 und 862 der BBG (Quelle: google)

Für die Mittelwertbildung aus den durch Simulation gewonnenen Kennzahlen werden für das Szenario „Werktagsverkehr“ 65 % und für das Szenario „Wochenendverkehr“ 35 % Anteil am Gesamtfahrplan unterstellt.

Zur Wiedergabe des Gesamtfahrbetriebes in einem Jahr muss darüber hinaus der mit der Umgebungstemperatur ansteigende Bedarf an Hilfsenergie für die Kühlung beziehungsweise Heizung des Fahrgastinnenraumes beachtet werden. Hierfür werden beide Fahrscenarien jeweils mit unterschiedlicher kontinuierlicher Hilfsbetriebeleistung der Fahrzeuge nach Tabelle 1 berechnet und mit der unterstellten Wichtung 42 Wochen Sommer- zu 10 Wochen Winterbetrieb gemittelt. Die Wichtung wurde durch Auswertung des Jahresgangs der Höchst- und Tiefsttemperaturen am Tag für die Stadt Eberswalde im Jahr 2010 abgeleitet (Quelle [www.wetter-online.de](http://www.wetter-online.de)). Dem Winterbetrieb werden dabei Tagestiefsttemperaturen unter 0 °C zugeordnet.

Alle Berechnungen werden zunächst ohne den Einsatz der Fahrzeugenergiespeicher durchgeführt. In einem zweiten Schritt wurde den Fahrzeugen jeweils ein Energiespeicher zugeordnet, mit dem überschüssige Bremsenergie vollständig eingespeichert und dem Fahrbetrieb wieder zugeführt wird. Der Einspeicherung von Bremsenergie in die Energiespeicher geht dabei, physikalisch bedingt, die Versorgung von Hilfsbetrieben des bremsenden Fahrzeuges aus gleichzeitig anfallender Bremsenergie des gleichen Fahrzeuges voraus. Bremsenergie, die weder auf dem bremsenden Fahrzeug noch durch andere Verbraucher im gleichen Fahrleitungsabschnitt verbraucht werden kann, wird auf dem Bremswiderstand in Wärme umgewandelt.

### 1.3 Ergebnisse der Netzberechnung

Die Darstellung der Berechnungsergebnisse erfolgt im Weiteren sowohl einzeln für die drei Unterwerksbereiche als auch für das Gesamtnetz.

#### 1.3.1 Kennzahlen des Fahrbetriebs

Für eine Bewertung der Berechnungsergebnisse und insbesondere im Hinblick auf die Abschätzung der Sinnfälligkeit eines Einsatzes stationärer Energiespeicher sind Besonderheiten des Fahrbetriebs, welche aus der Strecken- und Fahrplangestaltung resultieren, zu beachten. Tabelle 3 enthält die entsprechenden Kennzahlen für die beiden untersuchten Fahrplanszenarien für die drei Unterwerksbereiche und das Gesamtnetz.

			UW OST	UW MITTE	UW WEST	NETZ
<b>Szenario 1</b>	Länge Fahrleitung	[km]	10,3	4,4	14,4	29,1
	Kilometerleistung	[km]	24,1	19,5	34,8	78,4
	Zeit im UW-Bereich	[min]	87,0	67,2	86,9	241,1
	Geschwindigkeit	[km/h]	16,7	17,4	24,0	19,5
<b>Szenario 2</b>	Kilometerleistung	[km]	31,3	26,2	45,7	103,2
	Zeit im UW-Bereich	[min]	100,4	87,1	103,4	290,9
	Geschwindigkeit	[km/h]	18,7	18,0	26,5	21,3

Teil B (III), Tabelle 3: Kennzahlen des Fahrbetriebs (getrennt nach UW-Bereichen und das Gesamtnetz)

Es fällt auf, dass im Bereich des UW West ein verhältnismäßig hoher Anteil der Gesamtfahrleistung erbracht wird. Dies ist mit dem hohen Anteil der in diesem Netzabschnitt verlegten Fahrleitung zum Gesamtnetz erklärbar. Weiterhin markant sind die wesentlich höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten, welche die Fahrzeuge in diesem Netzabschnitt erreichen. Letzteres resultiert vornehmlich aus den vergleichsweise großen Haltestellenabständen auf diesem Streckenteil. In 1.1.1 ist das Geschwindigkeitsprofil der Fahrzeuge im Bereich des UW West ab etwa 4700 m für die Linie 861 Hin und ab etwa 5000 m für die Linie 862 Hin dargestellt.

Die höheren durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeiten beim Fahrplanszenario „Wochenendverkehr“ resultieren aus wesentlich geringeren Fahrgastwechselzeiten und verringertem Verkehrsaufkommen gegenüber dem Fahrplanszenario „Werktagsverkehr“. Diesem Umstand wird auch durch den Fahrplan Rechnung getragen.

### 1.3.2 Energiebedarf

Der Energiebedarf eines Fahrzeuges setzt sich zusammen aus der Energie für den Vortrieb des Fahrzeuges und der Energie zum Betrieb seiner Hilfsaggregate. Die untersuchten Fahrzeuge besitzen eine Fahrgastraumklimatisierung. Somit kann der Energiebedarf für die Hilfsbetriebe (Hydraulik, Pneumatik, Bordnetz-Elektrik, Großverbraucher) sowohl im Sommer- als auch im Winterbetrieb, wenn die Fahrgastraumheizung betrieben werden muss, im Vergleich mit dem Gesamtenergiebedarf des Fahrzeuges eine signifikante Größenordnung erreichen.

Bezüglich der Leistungen der Großverbraucher (Heizung/Klimaanlage) in Abhängigkeit der Außentemperatur konnten seitens des Auftraggebers keine näheren Angaben eingeholt werden. Die für Sommer- und Winterbetrieb angesetzte mittlere Hilfsbetriebeleistung nach Tabelle 1 ist daher als eine Abschätzung, basierend auf den angegebenen Anschlussleistungen und unter Berücksichtigung des Jahrestemperaturganges, zu verstehen.

**Spezifischer Traktions- und Hilfsenergiebedarf** (Abbildung 2)

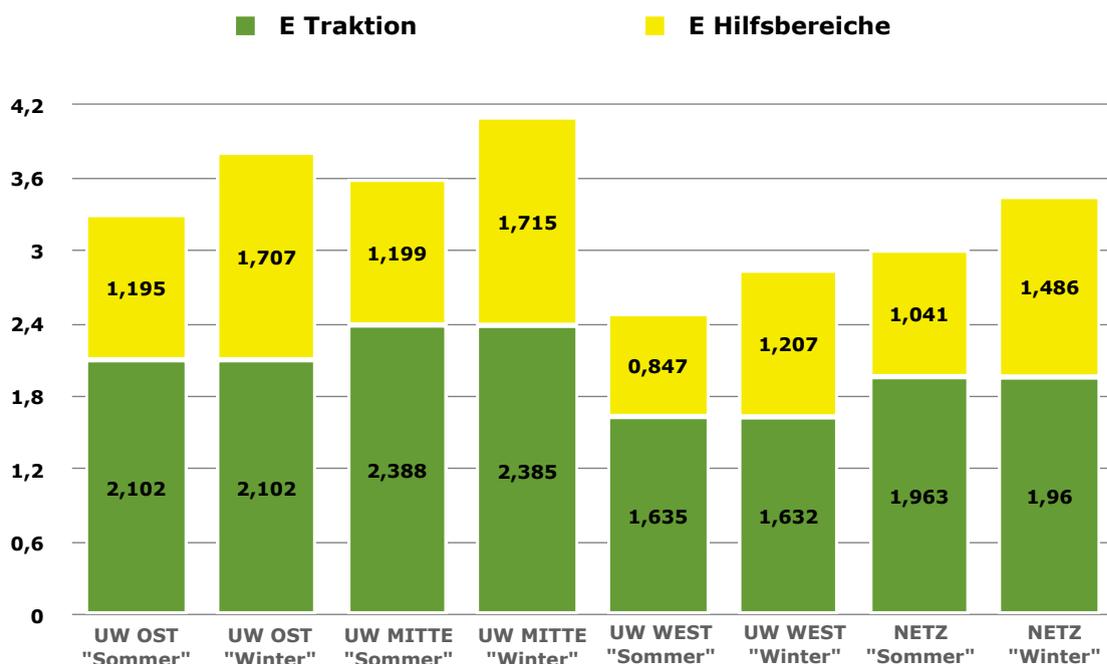




Abbildung 2 stellt die Energiebedarfskennwerte, getrennt nach Sommer- und Winterbetrieb, als gemittelte Werte beider Fahrscenarien dar.

Erkenntnisse:

- Während der Streckenteil, welcher durch das Unterwerk West mit elektrischer Energie versorgt wird, durch einen unterdurchschnittlichen Traktionsenergiebedarf gekennzeichnet ist, benötigen die Fahrzeuge im Unterwerksbereich Mitte verhältnismäßig viel Energie für die Erfüllung der Traktionsaufgabe. Als Ursache hierfür wird hauptsächlich die unterschiedliche Dichte planmäßiger und verkehrsbedingter Bremsprozesse zwischen dem innerstädtischen Bereich des UW „Mitte“ und dem Bereich des UW „West“ mit eher außerstädtischem Fahrprofil vermutet.
- Die wesentlichen Unterschiede bezüglich der mittleren Geschwindigkeiten in den Unterwerksbereichen (vgl. Tabelle 3) bedingen gleichzeitig einen unterschiedlichen spezifischen Energiebedarf zur Versorgung der Hilfsbetriebe.

Die Fahrzeugklimatisierung im Sommerbetrieb und die Fahrgastraumheizung im Winterbetrieb verursachen einen deutlichen Anteil des Fahrzeugenergiebedarfs. Der Anteil der Hilfsbetriebe am Gesamtenergiebedarf liegt im Sommer bei etwa 35 % und erreicht im Winterbetrieb etwa 43 %.

### 1.3.3 Energiebezug (ohne Energiespeicherung)

Der Energiebedarf der Fahrzeuge wird im Wesentlichen durch den Energiebezug aus den Unterwerken gedeckt. Hierbei entstehen Übertragungsverluste infolge von Leitungswiderständen in den Unterwerken selbst, deren erdverlegten Zuleitungen zu den Einspeisestellen und in den Fahrleitungen. Während die Verluste in den Unterwerken und den Zuleitungen stromabhängig sind, werden die Stromwärmeverluste in den Fahrleitungen zusätzlich durch den jeweiligen Abstand des Fahrzeuges zur Einspeisestelle beeinflusst. Die beschriebenen Verluste müssen, zusätzlich zum Energiebedarf der Fahrzeuge, durch die Unterwerke in das Oberleitungsnetz eingespeist werden, wodurch sich der Energiebezug aus den Unterwerken erhöht.

Ein kleinerer Anteil des Gesamtenergiebedarfs der Fahrzeuge wird durch einen Energieaustausch zwischen bremsenden Fahrzeugen und energiebeziehenden Fahrzeugen abgedeckt. Voraussetzung für diese netzinterne Nutzung von Bremsenergie ist, dass im selben Unterwerksbereich zumindest ein Fahrzeug einen negativen Leistungsbezug aufweist, sich also in einem Bremsprozess befindet, und gleichzeitig mindestens ein weiteres Fahrzeug einen positiven Leistungsbezug hat, also beschleunigt oder eine streckentopographisch bedingte Höhendifferenz ausgleicht.

Ohne Kenntnis der tatsächlich in den Fahrzeugen realisierten Steuerung zur Regelung von Leistungsflüssen in Bremsphasen wurde für die Berechnungen unterstellt, dass die auf einem Fahrzeug anfallende Bremsleistung zunächst für die Versorgung von Hilfsbetrieben auf dem Fahrzeug verwendet, dann im Netz auftretender Leistungsbedarf durch andere Fahrzeuge befriedigt und darüber hinaus auftretende, überschüssige Bremsenergie auf dem Bremswiderstand des Fahrzeuges in Wärme gewandelt wird.

Tabelle 4 stellt den ermittelten Energiebedarfswerten die berechneten Größen zum Energiebezug, also zur Befriedigung des Fahrzeugenergiebedarfs, für die zwei untersuchten Fahrplansenarien und getrennt nach „Sommer“ (SO) und „Winter“ (WI) gegenüber. Hierbei wurden die ermittelten Netzverluste dem Energiebedarf zugeordnet. Unter Netzbremmung wird die Abgabe von Bremsenergie an andere Fahrzeuge und unter Hilfsbetriebs-

bremmung die Befriedigung von Hilfsenergiebedarf aus Bremsenergie auf dem bremsenden Fahrzeug verstanden.

		UW OST		UW MITTE		UW WEST		NETZ		
Szenario 1	Energiebedarf		SO	WI	SO	WI	SO	WI	SO	WI
	Traktion	[kWh/km]	2,102	2,102	2,390	2,388	1,631	1,628	1,962	1,960
Hilfsbetriebe	[kWh/km]	1,237	1,768	1,214	1,736	0,874	1,247	1,070	1,528	
Netzverluste	[kWh/km]	0,148	0,167	0,345	0,383	0,091	0,109	0,170	0,193	
Szenario 1	Energiebezug		SO	WI	SO	WI	SO	WI	SO	WI
	Unterwerk	[kWh/km]	2,748	3,167	3,089	3,493	2,193	2,486	2,583	2,942
Netzbremmung	[kWh/km]	0,340	0,347	0,470	0,486	0,133	0,146	0,279	0,291	
Bremmung NV	[kWh/km]	0,399	0,522	0,391	0,529	0,270	0,351	0,339	0,447	
Szenario 2	Energiebedarf		SO	WI	SO	WI	SO	WI	SO	WI
	Traktion	[kWh/km]	2,103	2,103	2,384	2,380	1,642	1,639	1,965	1,962
Hilfsbetriebe	[kWh/km]	1,117	1,596	1,172	1,674	0,796	1,133	0,987	1,408	
Netzverluste	[kWh/km]	0,172	0,188	0,381	0,408	0,157	0,180	0,215	0,237	
Szenario 2	Energiebezug		SO	WI	SO	WI	SO	WI	SO	WI
	Unterwerk	[kWh/km]	2,772	3,185	3,321	3,693	2,332	2,634	2,707	3,061
Netzbremmung	[kWh/km]	0,308	0,305	0,226	0,241	0,055	0,061	0,175	0,180	
Bremmung NV	[kWh/km]	0,313	0,397	0,390	0,529	0,208	0,257	0,284	0,366	

Teil B (III), Tabelle 4: spezifischer Energiebedarf und Energiebezug ohne Energiespeicherung

#### Erkenntnisse:

- Die beim Szenario 2 „Wochenendverkehr“ erzielten höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten bedingen einen geringeren Hilfsenergiebedarf. Gleichzeitig sinkt hierdurch jedoch auch der spezifische Wert der Hilfsbetriebsbremsung.
- Die weniger dichte Fahrzeugfolge des Szenarios 2 bewirkt eine verminderte Möglichkeit zur Netzbremmung, also zur Abgabe von Bremsenergie an andere Fahrzeuge im gleichen Unterwerksbereich.
- Es wurde für das Szenario 2 sowohl im „Sommer“- als auch im „Winter“-Betrieb ein höherer spezifischer Energiebezug ab Unterwerk ermittelt, als für das Szenario 1 „Werktagsverkehr“. Dies ist auf einen verminderten Energieaustausch zwischen bremsenden und beschleunigenden Fahrzeugen zurück zu führen.

Aus den ermittelten Kennzahlen kann, unter Berücksichtigung der dargestellten Wichtungsfaktoren zwischen den beiden Fahrplanszenarien und für Sommer/Winterbetrieb die spezifische Bruttoenergieaufnahme, die spezifische Netzbremmung und aus beiden Zahlen die spezifische Nettoenergieaufnahme am Stromabnehmer als Durchschnittswerte für den Betrieb der Fahrzeuge über das Jahr im Gesamtnetz berechnet werden (Tabelle 5).

		Jahreswerte
Energieaufnahme (brutto)	[kWh/km]	2,750
Netzbremmung	[kWh/km]	0,245
Energieaufnahme (effektiv)	[kWh/km]	2,505

Teil B (III), Tabelle 5: Energiebedarf Fahrzeug

### 1.3.4 Energiebezug (mit Energiezwischenspeicherung auf dem Fahrzeug)

Das Ziel der Simulationsrechnungen bestand in der Ermittlung des Potentials zur Absenkung der Unterwerkseinspeisung. Dies soll erreicht werden, indem mittels stationärer Energiespeicher bisher ungenutzte Bremsenergie in Phasen, in denen im Unterwerksabschnitt ein Leistungsüberschuss besteht, eingespeichert und in Phasen, in denen im Unterwerksabschnitt Leistungsbedarf besteht, dem Fahrprozess wieder zugeführt wird.

Für die Simulationsrechnungen wurde jedem Fahrzeug ein mobiler Energiespeicher mit den Daten aus Tabelle 1 zugeordnet und das Fahrzeuggesamtgewicht entsprechend erhöht. Hierdurch wird ein Anstieg des Traktionsenergiebedarfs von etwa 1,3 % verursacht, wodurch sich der Gesamtenergiebedarf um etwa 0,8 % erhöht. Auf eine detaillierte Darstellung dieser Berechnungsergebnisse wurde verzichtet.

Die Steuerung des Energiespeichers sieht vor, durch Bremsprozesse anfallende Energie möglichst vollständig einzuspeichern. Dies ist jedoch unvermeidlich mit Übertragungsverlusten verbunden. In Phasen des Fahrbetriebs, in denen infolge von Beschleunigungen und/oder von Hilfsbetrieben ein Leistungsbedarf besteht, übernimmt der Energiespeicher vollständig die Befriedigung des Leistungsbedarfs, bis dessen unteres Ladeniveau erreicht wird. Aus dem Energiespeicher wird dem Fahrbetrieb so viel Energie zugeführt, wie in Phasen von Leistungsüberschuss aufgenommen wird, vermindert um den Betrag innerer Energiespeicherverluste. Auf die inneren Speicherverluste wird bei der Bewertung des mobilen Energiespeichersystems näher eingegangen.

		UW OST		UW MITTE		UW WEST		NETZ	
Szenario 1	Energiebedarf	SO	WI	SO	WI	SO	WI	SO	WI
	aus UW ohne ES	[kWh/km]	2,748	3,167	3,089	3,493	2,193	2,486	2,583
aus UW mit ES	[kWh/km]	2,234	2,762	2,559	3,073	1,776	2,139	2,108	2,559
Absenkung Energiebezug UW		SO	WI	SO	WI	SO	WI	SO	WI
	[%]	18,7	12,8	17,2	12,0	19,0	14,0	18,4	13,0
Szenario 2	Energiebedarf	SO	WI	SO	WI	SO	WI	SO	WI
	aus UW ohne ES	[kWh/km]	2,772	3,185	3,321	3,693	2,332	2,634	2,707
aus UW mit ES	[kWh/km]	2,172	2,680	2,545	3,026	1,756	2,125	2,075	2,515
Absenkung Energiebezug UW		SO	WI	SO	WI	SO	WI	SO	WI
	[%]	21,6	15,9	23,4	18,0	24,7	19,3	23,3	17,8

Teil B (III), Tabelle 6: Energieeinsparung durch mobile Energiespeicher

Tabelle 6 enthält die ermittelten spezifischen Werte für die Energiebezüge aus den Unterwerken und als Mittelwerte für das Gesamtnetz, für die untersuchten Fahrplanszenarien im Sommer- und Winterbetrieb und im Vergleich ohne und mit Energiespeichereinsatz.

Erkenntnisse:

- Der Einsatz der Fahrzeugenergiespeicher bewirkt im Sommerbetrieb eine höhere Absenkung des Unterwerksbezuges. Ursache hierfür ist der kleinere Anteil ungenutzter Bremsenergie der Fahrzeuge im Winterbetrieb infolge des erhöhten Hilfsenergiebedarfs.
- Beim untersuchten Fahrplanszenario „Wochenendverkehr“ besteht gegenüber dem Fahrplanszenario „Werksverkehr“ ein erhöhtes Potential zur Rückgewinnung von Bremsenergie, vornehmlich infolge der geringeren Fahrzeugdichte und der dadurch verminderten Möglichkeit zur Netzbremmung.

### 1.3.5 Energiesparpotential für mobile Energiespeicherung

Die Absenkung des Energiebezugs aus den Unterwerken ist für den Betreiber eines elektrischen Fahrbetriebs die Entscheidungsgröße zur realistischen Einschätzung von Maßnahmen, die auf eine Steigerung der Energieeffizienz abzielen. Dabei ist vornehmlich das Betriebsergebnis als Jahresmittelwert eine Entscheidungshilfe für strategische Entscheidungen.

Tabelle 7 fasst die ermittelten Energiesparpotentiale für den Fahrbetrieb, die beim Einsatz der Fahrzeugenergiespeichersysteme als Ergänzung zur konventionellen Fahrzeugausstattung erwartet werden können, als Jahresmittelwerte zusammen. Dabei wurden wiederum die dargestellten Wichtungsfaktoren zwischen den beiden untersuchten Fahrplanszenarien sowie zwischen „Sommer“- und „Winter“-Betrieb zugrunde gelegt.

		UW OST	UW MITTE	UW WEST	NETZ	
<b>Jahresmittel</b>	Energiebezug UW ohne ES	[kWh/km]	2,837	3,246	2,299	2,695
	Energiebezug UW mit ES	[kWh/km]	2,313	2,651	1,839	2,183
	Absenkung Energiebezug UW	[%]	18,5	18,3	20,0	19,0

Teil B (III), Tabelle 7: ermitteltes Energiesparpotential durch mobile Energiespeicher (Jahresmittel)

Es ist anzumerken, dass innerhalb der Simulationsarbeiten nur kleine Fahrplanausschnitte (vgl. Tabelle 2) und jeweils der reine Fahrbetrieb betrachtet wurden. Verschiebungen des spezifischen Unterwerksbezuges, die sich im realen Fahrbetrieb beispielsweise durch

- den Energiebedarf für den Betrieb von Hilfsbetrieben der Fahrzeuge während des Aufenthaltes im Fahrzeugdepot, an Endhaltestellen und während Auf- und Abrüstzeiten,
- den Einfluss des unterschiedlichen Höhenprofils auf Hin- und Rückstrecken, der innerhalb der Simulationsarbeiten nur durch einen unverhältnismäßig großen Betrachtungszeitraum eliminiert werden kann,
- den Einfluss der Umgebungstemperatur auf den spezifischen elektrischen Widerstand der Einspeisekabel und Fahrleitungsdrähte *und*
- den Energiebedarf zum Betrieb von Hilfsanlagen des Energieversorgungsnetzes, insbesondere in den Unterwerken

ergeben können, wurden innerhalb der Simulationsarbeiten nicht erfasst.

Mit den Randbedingungen eines durchschnittlichen jährlichen Fahrbetriebes von 48 Wochen auf jeder Linie, der Erfassung von nur „vollständigen“ Umläufen des Fahrplans, einer 70%/30% Mittelung zwischen Schul- und Ferienbetrieb und 14 ct/kWh Energiebezugspreis (Angabe Barnimer Busgesellschaft mbH) erfolgte die Abschätzung des monetären Einsparpotentials nach Tabelle 8.

			<b>Anteil UW OST</b>	<b>Anteil UW MITTE</b>	<b>Anteil UW WEST</b>
	861 Hin	[km]	2,525	2,180	3,215
	861 Rück	[km]	3,440	2,180	5,010
	861 Hin	[km]	2,700	2,180	5,140
	862 Rück	[km]	2,700	2,180	3,225
<b>Fahrten „Jahr“</b>	861 Hin	[-]	18528		
	861 Rück	[-]	18528		
	861 Hin	[-]	17472		
	862 Rück	[-]	17232		
	Kilometerleistung	[km]	204220	156437	297772
	Potential	[kWh/km]	0,524	0,595	0,460
	Potential monetär	[T€/Jahr]	15,0	13,0	19,2

Teil B (III), Tabelle 8: Energiesparpotential (monetär)

Mit allen getroffenen Annahmen wurde innerhalb der Simulationsrechnungen ein monetäres Einsparpotential von jährlich etwas über 48 T€ für den gesamten Fahrbetrieb der Barliner Busgesellschaft mbH errechnet. Dieser finanzielle Vorteil ergibt sich durch den Einsatz von Fahrzeugenergiespeichersystemen mit den technischen Eigenschaften nach Tabelle 1 auf jedem eingesetzten Fahrzeug. Die Bewertung in Form einer Kosten-/Nutzenrechnung obliegt dem Auftraggeber in seiner Eigenschaft als Beschaffer und Betreiber der Fahrzeuge.

### 1.3.6 Ungenutzte Bremsenergie

Das Ziel der Untersuchungen bestand in der Beantwortung der Frage, ob auch mit Einsatz mobiler Energiespeicher ein signifikantes Energiesparpotential verbleibt. Hierfür werden die ermittelten Energieumsätze in den Bremswiderständen der Fahrzeuge nach Tabelle 9 herangezogen. Für eine Abschätzung des noch vorhandenen Energiesparpotentials müssen diese Werte noch um Übertragungsverluste zwischen den bremsenden oder beschleunigenden Fahrzeugen und den stationären Energiespeichersystemen, die beispielsweise an den Unterwerken angeordnet sein könnten, vermindert werden.

<b>Jahresmittel</b>		<b>UW OST</b>	<b>UW MITTE</b>	<b>UW WEST</b>	<b>NETZ</b>
Energie in Bremswiderständen	[kWh/km]	0,126	0,112	0,059	0,093

Teil B (III), Tabelle 9: verbleibendes Einsparpotential

Im Vergleich mit dem durch den Einsatz von Fahrzeugenergiespeichern erschlossenen Anteil bisher ungenutzter Bremsenergie (vgl. Tabelle 8) fällt das weiterhin erschließbare Energiesparpotential, welches sich dadurch ergibt, dass anfallende Bremsenergie infolge eines unzureichend großen Nutzenergieinhaltes der Fahrzeugenergiespeicher nicht nutzbar gemacht werden kann, verhältnismäßig klein aus und lässt keinen positiven wirtschaftlichen Effekt bei Anschaffung stationärer Energiespeicher erwarten.

## 2. Bewertung der mobilen Energiespeichersysteme

Für die Erfüllung des Betriebsziels wird ein Superkondensatorspeichersystem vorgesehen, mit welchem in Bremsphasen überschüssige Bremsenergie möglichst vollständig zwischengespeichert und bei nachfolgender Leistungsanforderung abgegeben werden kann.

### 2.1 Nutzenergieinhalt

Die ermittelten Anteile ungenutzter Bremsenergie nach Tabelle 9 lassen einen ersten Rückschluss bezüglich des Vermögens der eingesetzten Fahrzeugenergiespeichersysteme zur Einspeicherung von Bremsenergie zu. Das Potential zur Nutzung anfallender Bremsenergie hängt wesentlich vom Energiebedarf von Hilfsbetrieben während Bremsphasen ab, dieser konnte innerhalb der Untersuchung nur als grobe Abschätzung vorgenommen werden. Es wird eingeschätzt, dass erst eine hinreichend große Betriebserfahrung einen genauen Rückschluss hinsichtlich der Dimensionierung der Fahrzeugenergiespeichersysteme erlauben wird.

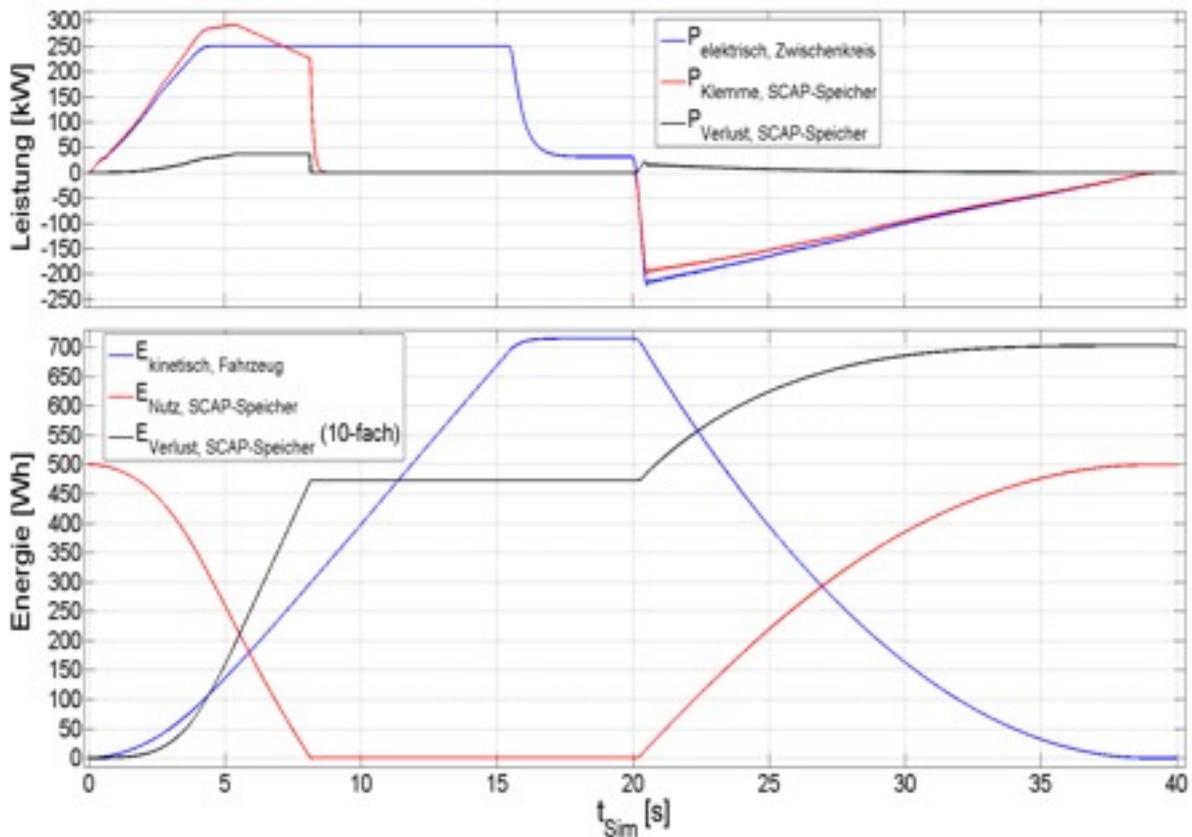
### 2.2 Speicherverluste und Speichersteuerung

Die Gesamtverluste eines Energiespeichersystems ergeben sich summarisch aus den Einzelverlusten der Energiespeicherelemente (SCAP-Speicher), zugehöriger Leistungselektronik, Drosselinduktivitäten und zum Betrieb notwendiger Zusatzeinrichtungen, beispielsweise für Kühlung und Steuerung. Da das System konvektiv gekühlt wird, sind bezüglich der Zusatzeinrichtungen keine signifikanten Verlustanteile zu erwarten. Es konnten bisher keine technischen Angaben bezüglich der Drosselinduktivitäten und Leistungselektronik ermittelt werden. Für letztgenannte ist aufgrund des Bereiches der Arbeitsspannung an der Speicherklemme von einem Vierquadrantensteller auszugehen, die in dieser Leistungsklasse einen Wirkungsgrad von etwa 95 % aufweisen.

Zur Bewertung des Speicherwirkungsgrades ist es allgemein üblich, die bei einem vollständigen Entlade- und Aufladeprozess entstehenden Übertragungsverluste zu ermitteln und auf den erzielten Energieumsatz zu beziehen. Bezüglich der untersuchten Fahrzeuge wird eine derartige Untersuchung möglich, wenn man ein Fahrzeug mit den Daten nach Tabelle 1 und vollständig aufgeladenem Energiespeicher auf ebener Strecke bis zu einer Geschwindigkeit von etwa 55 km/h beschleunigt und anschließend bis zum Stillstand abbremst. Die für eine Bewertung des Teilwirkungsgrades der Speicherelemente notwendigen Berechnungsergebnisse zeigt Abbildung 3.

Das obere Teildiagramm enthält die sich am Fahrzeugzwischenkreis und an der Energiespeicherklemme ergebenden Leistungsverläufe, sowie den Verlauf der infolge der Strombelastung durch den Innenwiderstand der Speicherelemente erzeugten Verlustleistung. Das untere Teildiagramm stellt die Verläufe des Nutzenergieinhaltes des Fahrzeugenergiespeichers und der Verlustenergie in den Speicherelementen als zeitliches Integral der Verlustleistung dar. Für eine anschaulichere Darstellung wurde der Verlauf der Verlustenergie 10-fach vergrößert dargestellt. Das untere Teildiagramm enthält zusätzlich den Verlauf der kinetischen Energie des Fahrzeuges als abgeleitete Größe aus dessen Momentangeschwindigkeit.

Mit der zuvor beschriebenen Strategie zur Speichersteuerung erzeugen die Speicherelemente bei einem Gesamtenergieumsatz von 1 kWh etwa 70 Wh Verlustenergie. Der Teilwirkungsgrad der Speicherelemente liegt bei 93 %.



Teil B (III), Abb. 3: Speicherzyklus an der Klemme des ES am UW WEST für das Szenario 2 im Sommerbetrieb

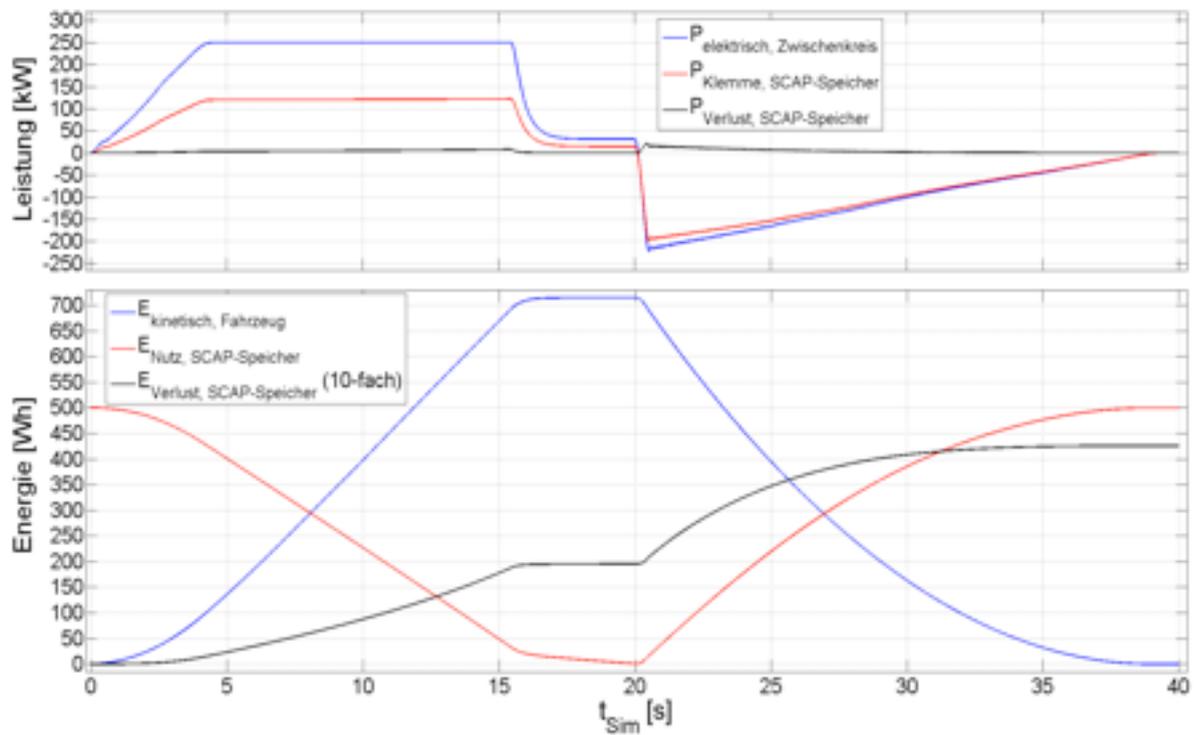
Am Markt sind heute vergleichbare Superkondensatoren verfügbar, die einen geringeren Innenwiderstand aufweisen. Würde man, bei ansonsten unverändertem Aufbau des Speicherelementes, die eingesetzten Einzelzellen durch Superkondensatoren des Typs BCAP3000 P270 der Firma Maxwell ersetzen, könnte die zuvor berechnete Verlustenergie auf etwa 41 Wh abgesenkt und der Teilwirkungsgrad der Speicherelemente auf 96 % erhöht werden.

Ein ähnlich hoher Teilwirkungsgrad der Speicherelemente ist bei unveränderter Anlagentechnik durch eine andere Strategie zur Steuerung des Energiespeichers erreichbar. Diese zielt darauf ab, die Beteiligung des Energiespeichersystems an der Bereitstellung von Traktionsleistung über dem gesamten Fahrabschnitt positiven Leistungsbedarfes (Beschleunigung und Konstantfahrt) gleichmäßiger zu gestalten.

Hierdurch soll in dieser Phase eine Absenkung der infolge der Strombelastung durch den Innenwiderstand der Speicherelemente erzeugten Verlustleistung erzielt werden. Im Fahrabschnitt positiven Leistungsbedarfes (Bremsen) bleibt die Strategie zur Speichersteuerung unverändert, anfallende Bremsenergie wird vollständig eingespeichert.

Abbildung 4 veranschaulicht die Auswirkung der veränderten Steuerung auf die Klemmen- und Verlustleistung (oberes Teildiagramm) sowie als daraus resultierende Folge die Absenkung der Verlustenergie im Fahrabschnitt positiven Leistungsbedarfes.

Die Verlustenergie kann auf etwa 43 Wh abgesenkt werden und der Teilwirkungsgrad der Speicherelemente erhöht sich auf knapp 96 %. Durch die verringerte Strombelastung werden ebenfalls positive Effekte bezüglich der Teilwirkungsgrade von Drosselinduktivitäten und Leistungselektronik erwartet.



Teil B (III), Abb. 4: Speicherzyklus an der Klemme des ES am UW WEST für das Szenario 2 im Sommerbetrieb

**Quellenangaben:**

[KLA 1201]

Klausner, Sven; Knotte, Thoralf: Netzberechnung und Entwurfsplanung für energieeffizienten O-Bus Betrieb der Barnimer Busgesellschaft mbH; interner Bericht des Fraunhofer IVI vom 18.07.2011



**TEIL B (IV)**  
**Europas erster Oberleitungs-**  
**hybridbus**

**Anmerkung:**

Die Machbarkeitsstudie des Fraunhofer-Instituts für Verkehrs- und Infrastruktursysteme ergab, dass eine Installation von Supercapacitors in einem Unterwerk nicht sinnvoll scheint, wenn Energie bereits im Fahrzeug gespeichert werden kann.

Die Barnimer Busgesellschaft mbH sah von dieser Investition ab und entschied sich für die Ausrüstung eines O-Busses von Solaris mit einer Lithium-Ion-Batterie, anstelle des dieselmotorisch betriebenen Hilfsgenerators. O-Bus Nr. 063 verfügt nunmehr sowohl über Supercaps und Lithium-Ion-Batterie.

## Emissionsfrei durch Eberswalde mit dem Oberleitungshybridbus

Mit der Lieferung des letzten O-Busses von Solaris/Cegelec erhielt die Barnimer Busgesellschaft mbH im Juni 2012 einmal mehr ein innovatives und bisher einmaliges Fahrzeug: den ersten Oberleitungshybridbus seiner Art.

Insgesamt zwölf neue Oberleitungsbusse wurden im Jahr 2009 beim Hersteller Solaris bestellt. Nach achtzehn Jahren sollten die alten Fahrzeuge von MAN ausgesondert werden und einer neuen Generation weichen.

Als besonderes technisches Highlight konnte bereits im Oktober 2010 der erste neue O-Bus mit verbauten Supercaps bestaunt werden. Supercaps sind Kondensatoren mit hoher Kapazität im Farad-Bereich, die zu einer Batterie zusammengeschaltet sind. Diese Hochleistungs-Kondensatoren werden zunächst mit überschüssiger Energie aufgeladen, die im Fahrzeug sonst verloren ginge, wie z.B. Bremsenergie.

Anschließend kann die gespeicherte Energie wieder für verschiedene Fahrzeugprozesse freigesetzt werden für:

- Antriebsprozesse,
- Belüftungsprozesse,
- die Beleuchtung,
- den Kompressorbetrieb,
- die Klimaanlage,
- die Beheizung der Fahrzeuge oder
- für den Betrieb der Fahrzeugluftanlage.

Durch den Einsatz dieser Supercaps konnte der Energieverbrauch bereits um 17 % gesenkt werden.

Einen Schritt weiter ging die Barnimer Busgesellschaft mbH mit den Herstellern Solaris und Cegelec nunbei der Bestellung des zwölfsten und letzten Fahrzeuges, intern unter der Nummer 063 geführt. Während die elf vorher gelieferten O-Busse, wie sonst üblich, mit einem dieselmotorisch betriebenen Generator (auch APU genannt) ausgestattet wurden, verzichtete man beim letzten Fahrzeug auf den Generator zugunsten einer Lithium-Ionen-Batterie. Erstmals werden Fahrgäste deshalb vergebens nach einem Auspuffrohr am Fahrzeug suchen.

## Eigenschaften und Merkmale der Lithium-Ionen-Batterie im Fahrzeug BAR-BG 963

### TECHNISCHE DATEN:

#### Die Zellen weisen folgende Kenndaten auf:

<u>Modell:</u>	WB-LYP100AHA
<u>Nennkapazität:</u>	100 Ah
<u>Arbeitsspannung:</u>	2,8 - 4,0 V
<u>Höchststrom:</u>	0,5C/2C = 50/200A (Lade-, Entladestrom)
<u>Gewicht:</u>	3,5 kg +/- 100g

#### Die Kenndaten des Systems:

<u>Kennzeichnung:</u>	EVC-LYP200/108A
<u>Anzahl der Zellen:</u>	2x 108 Stücke in Serie
<u>Kapazität:</u>	200 Ah
<u>Spannung:</u>	2,8/3,2/3,43/3,65 V/cell (Minimum-/Nenn-/Ladespannung: 85 %/Ladespannung) 308/352/377/395 V
<u>Höchststrom:</u>	2 Sektionen parallel 0,5 C/2C = 100/400 A (Lade-, Entladestrom)
<u>Gesamtenergie:</u>	70,4 kWh
<u>Ausnutzbare Energie:</u>	(SOC 25 - 85 %) 42,2 kWh
<u>Ausnutzbare Höchstleistung:</u>	120 kW
<u>Gewicht (nur Zellen):</u>	756 kg
<u>Gewicht der ganzen Box:</u>	1.020 kg
<u>Zeit für Ladung:</u>	(SOC 25 - 85 %) ca. 75 Minuten
<u>Zeit für die erneute Ladung nach einer Fahrstrecke von 5 km*:</u>	ca. 20 Minuten
<u>Anzahl der vorausgesetzten Zyklen (SOC 25 - 85 %):</u>	3.000 Zyklen
<u>Anzahl der vorausgesetzten Zyklen (nach der gefahrenen Strecke von*):</u>	ca. 12.000 Zyklen

\* Anforderungen der Barnimer Busgesellschaft mbH

Durch den Verzicht des Generators für die Lithium-Ionen-Batterie verfügt dieser innovative O-Bus nun über zwei vollwertige elektrische Antriebssysteme. Mit Stolz kann er daher als Oberleitungshybridbus bezeichnet werden und ist der Erste seiner Art. Emissionsfrei wird der Bus künftig durch Eberswalde rollen und kann seinen Fahrstrom nun entweder aus der Fahrleitung beziehen oder aus der Lithium-Ionen-Batterie. In beiden Fällen wird er von den zusätzlich verbauten Supercaps unterstützt. Für kurze Strecken z.B. auf dem Betriebshof besteht sogar noch eine dritte Antriebsmöglichkeit - über die Supercaps selbst.

Grundsätzlich hat diese Lithium-Ionen-Batterie eine Gesamtkapazität von 70,4 kWh. Pro Kilometer liegt der Verbrauch bei ca. 2,5 kWh. Damit könnte man, zumindest rein rechnerisch, sogar eine Strecke von über 28 km zurücklegen. In der Praxis wird sich dieser errechnete Wert aber nicht durchsetzen. Mit einer zu tiefen Entladung verkürzt sich nämlich die Lebensdauer der Batterie erheblich. Schlussendlich wird sich die Gesamtkapazität im Normalbetrieb bei 42,2 kWh einfinden, was einem Ladezustand von 85% entspricht.

Die Lithium-Ionen-Batterie im Oberleitungshybridbus wurde vor der Lieferung nach Eberswalde im Juni 2012 bereits ausführlich in Ostrava (CZ) getestet. Ostrava entspricht in seiner Topografie den Eberswalder Gegebenheiten. Im Testbetrieb wurde dort sogar eine Strecke von über 18 km zurückgelegt.

In der Praxis soll dagegen maximal eine Strecke von 5 Kilometer zurückgelegt werden, um ca. 12.000 Ladezyklen zu erreichen. Für eine Strecke von 5 km wird eine Ladezeit von ca. 20 Minuten benötigt. Die Batterie wird über die Stromabnehmer an der Oberleitung wieder aufgeladen.

War zuvor noch für den Fahrgast herauszuhören, wenn der O-Bus auf den Generator zurückgreifen musste, so wird er dieses in Zukunft nicht mehr wahrnehmen.

Dieser Oberleitungshybridbus wurde im Rahmen des EU-Projektes "Trolley - Promoting electric public transport" gefördert. Erfahren Sie mehr unter [www.trolley-project.eu](http://www.trolley-project.eu)



Teil B (IV), Abb. 1: Das Design des Oberleitungshybridbuses

## **IMPRESSUM**

Barnimer Busgesellschaft mbH  
Poratzstraße 68  
16225 Eberswalde  
Deutschland  
Tel. +49 3334 23 50 03  
Fax +49 3334 22 20 4  
info@bbg-eberswalde.de  
www.bbg-eberswalde.de

### **Rückfragen zum Projekt:**

Projekt-Manager  
der Barnimer Busgesellschaft mbH  
für das Projekt "Trolley - Promoting electric public transport"  
Mandy Kutzner  
Tel. +49 3334 5 22 33  
unterwegs@bbg-eberswalde.de

### **Umsetzung, Layout dieser Broschüre:**

Mandy Kutzner  
Marketing  
Tel. +49 3334 5 22 33  
unterwegs@bbg-eberswalde.de

### **Teil A**

Im Auftrag der Barnimer Busgesellschaft mbH erarbeitet durch:

#### **PLANUNGSBÜRO FÜR VERKEHR**

Bornkessel, Brohm & Markgraf  
Scharnweberstraße 56  
D - 10247 Berlin  
Tel. +49 30 29 66 80 60  
Fax +49 30 29 66 80 61  
www.pbv-berlin.de

### **Teil B**

Im Auftrag der Barnimer Busgesellschaft mbH erarbeitet durch:

#### **FRAUNHOFER-INSTITUT**

für Verkehrs- und Infrastruktursysteme  
Zeunerstraße 38  
D - 01069 Dresden

### **Fotos:**

Museum Eberswalde, Adpic, Veit Springer, Joachim Lerch, Robert Hellmann, Carsten Banach, Archiv  
Barnimer Busgesellschaft mbH

### **Stand:**

12. Februar 2013

**Dieses Projekt wird im Rahmen des CENTRAL EUROPE Programms umgesetzt und durch EFRE Mittel kofinanziert.**

Die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieser Publikation liegt bei dem Autorenteam. Die Publikation gibt nicht unbedingt die Meinung der Europäischen Gemeinschaften wieder. Die Europäische Kommission übernimmt keine Verantwortung für jegliche Verwendung der darin enthaltenen Informationen. Nachdruck und Übersetzung der Veröffentlichung – außer zu kommerziellen Zwecken – mit Quellenangabe sind gestattet, sofern der Herausgeber vorab unterrichtet und ihm ein Exemplar übermittelt wird.



