

Trolley

Promoting *electric* public transport



Der O-Bus als intelligente und nachhaltige Lösung für Europa

Arbeitsergebnisse der Barnimer Busgesellschaft
aus dem EU-Projekt
"Trolley - Promoting Electric Public Transport"



EUROPEAN UNION
EUROPEAN REGIONAL
DEVELOPMENT FUND

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



Trolley - Promoting *Electric* Public Transport

INHALTSVERZEICHNIS

TROLLEY - Promoting electric public transport	4
--	----------

TEIL A

Untersuchung von Verkehrsgebieten hinsichtlich der möglichen Erweiterung von O-Bus-Netzen	8
--	----------

TEIL B

(I) Stationäre Energiespeichersysteme in Fahrleitungsnetzen von Nahverkehrsbahnen und O-Bussen	34
(II) Untersuchung über die Auswahl und den Einsatz eines Energiespeichers im Fahrleitungsnetz von O-Bussen (MAN NGE 152)	52
(III) Ergänzende Untersuchung über die Auswahl und den Einsatz eines Energiespeichers im Fahrleitungsnetz von O-Bussen (Solaris Trollino 18)	76
(IV) Europas erster Oberleitungshybridbus	94

TEIL C

Marketing-Aktivitäten	102
------------------------------------	------------

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?

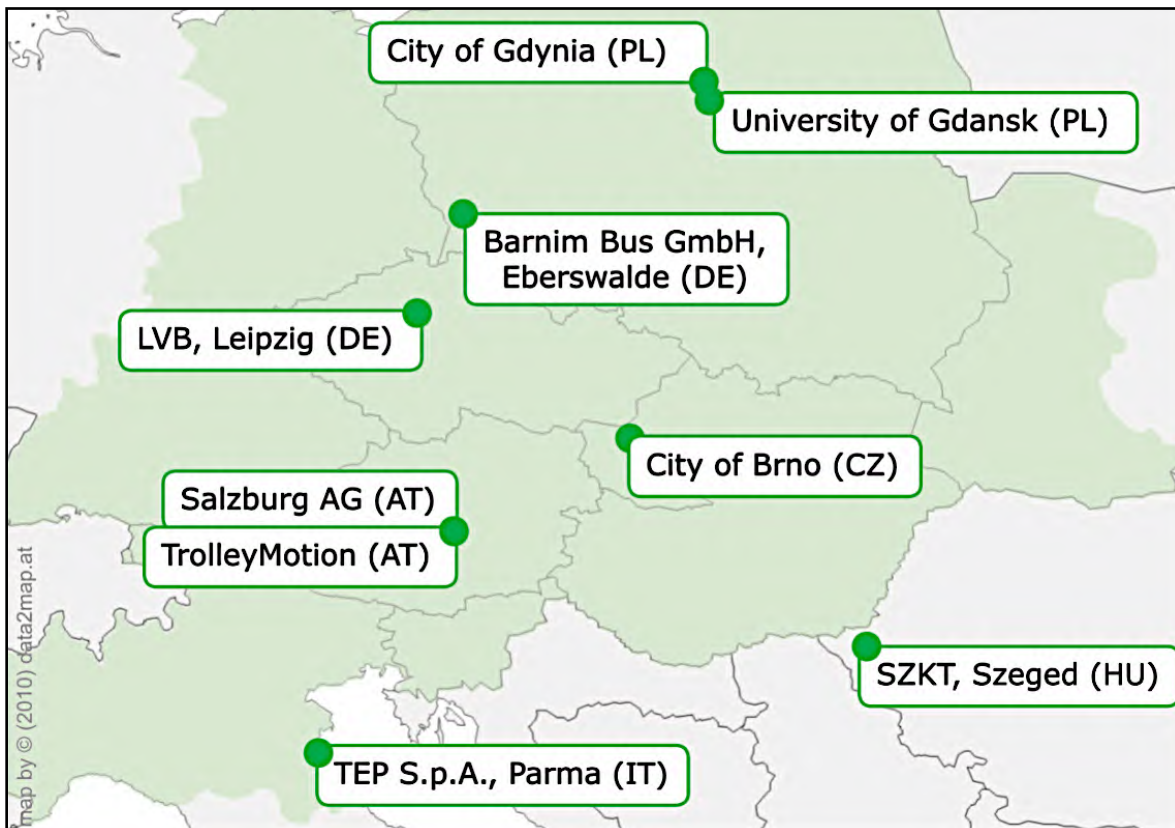
Das *TROLLEY* Konsortium besteht aus neun europäischen Stakeholdern im elektrischen ÖPNV aus insgesamt sechs Ländern:



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 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.



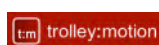
Gdynia (Polen): Gdynia hat das größte O-Busnetz in Polen, das auch die Nachbarstadt Sopot anbindet. Gdynia ist ein Experte bei der Umwandlung von alten Dieselnissen in moderne O-Busse.



Universität von Gdansk (Polen): Die polnische Universität von Gdansk hat einen europaweiten 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-Bus-systeme. Dieser Partner kennt sich besonders gut mit kombinierten Straßenbahn-O-Bus-Systemen aus und baut seine kontinuierlich aus.



TrolleyMotion: 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

Programm:	INTERREG IVB CENTRAL EUROPE Programm (Mitteleuropa)
Priorität:	Priorität 2, Verbesserung der Erreichbarkeit von und innerhalb Mitteleuropa(s)
Anzahl der Partner:	9
Hauptpartner:	Salzburg AG, Österreich
ERDF Fördermittel:	~ 3,3 Millionen Euro
Gesamtkosten:	~ 4,2 Millionen Euro
Projektstart:	01.02.2010
Projektende:	31.03.2013
Sonstiges:	Größtes Projekt im zweiten Projektaufruf 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**.

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





TEIL A:

Untersuchung von Verkehrsgebieten hinsichtlich der möglichen Erweiterung von O-Bus-Netzen



Im Auftrag der Barnimer Busgesellschaft erarbeitet durch:
PLANUNGSBÜRO FÜR VERKEHR
Bornkessel, Brohm & Markgraf Scharnweberstraße 56
D - 10247 Berlin
Fon 030. 29 66 80 60
Fax 030. 29 66 80 61
www.pbv-berlin.de

1. Ausgangssituation und Grundlagen

Mit den sich verändernden Rahmenbedingungen im Bereich des Energiesektors ist auch eine Neubewertung der Zukunftsfähigkeit vorhandener Verkehrsmittel innerhalb der öffentlichen Verkehrssysteme verbunden.

Für den bisher oft vernachlässigten O-Busverkehr ergeben sich daraus neue Perspektiven. Ein Beitrag zur Einschätzung dieser Perspektiven soll innerhalb des INTERREG-Projektes *TROLLEY* vorgenommen werden.

Im Rahmen des Gesamtprojektes werden technische, technologische und verkehrsplanerische Aspekte des O-Bus-Betriebes vertiefend untersucht. Ziel ist es, das System O-Bus zu stärken und bewusster als zukunftsfähiges Verkehrssystem in der Öffentlichkeit darzustellen.

In die Gesamtuntersuchung sind insbesondere die bestehenden bzw. geplanten O-Bus-Netze der städtischen Verkehrsunternehmen von Salzburg und Eberswalde einbezogen. Diese kooperieren im Rahmen des *TROLLEY*-Projektes.

Einen Baustein innerhalb des Gesamtprojektes bildet die "Untersuchung von Verkehrsgebieten hinsichtlich der möglichen Erweiterung von O-Bus-Netzen". Für diese Thematik erfolgte eine eigenständige Betrachtung bestehender Möglichkeiten und Optionen an Hand eines Referenznetzes. Ziel der Arbeiten war die Untersuchung von Möglichkeiten und Grenzen beim Einsatz bzw. der Erweiterung von O-Bus-Systemen.

Ausgangspunkt ist das O-Bus-System der Stadt Eberswalde. Dieses wird von der Barnimer Busgesellschaft mbH (BBG) betrieben. Der O-Bus in Eberswalde ist seit 1940 in Betrieb und seitdem mehrfach erweitert bzw. umgestaltet worden.

Das bestehende Netz wurde in einem ersten Schritt in seinen Grundlagen analysiert (Kaptitel 2). Dabei wurden zunächst strukturelle Aspekte des Untersuchungsgebietes betrachtet. Dazu kam ein Vergleich vorhandener Kennziffern von O-Bus und Dieselsbus auf Grundlage von erhobenen Eckwerten der Barnimer Busgesellschaft.

An Hand der vorliegenden Ausgangsdaten erfolgte die Untersuchung möglicher Netzerweiterungen für das O-Bus-Netz Eberswalde (Kapitel 3). Diese gliedert sich in die Optionen

- Netzerweiterung in städtische Randbereiche (Abschnitt 3.2) und
- Netzerweiterung in Vororte (Abschnitt 3.3).

Die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden im folgenden Schritt mit den Ergebnissen einer parallel geführten Untersuchung zu möglichen Erweiterungen des O-Bus-Netzes der Stadt Salzburg verglichen. Damit verbunden war eine verallgemeinerte Ableitung von Kriterien für die Erweiterung von O-Bus-Systemen (Kaptitel 4).

Eine Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse schließt die vorliegende Dokumentation ab.

2. Analyse Eberswalde

2.1 Grundlagen

Ziel des ersten Schrittes war die Analyse grundlegender struktureller und systembezogener Rahmenbedingungen für das O-Bus-System in Eberswalde. Dabei standen zunächst folgende Aspekte im Mittelpunkt:

- Analyse der raumstrukturellen Rahmenbedingungen (Einwohner, Bevölkerungsstruktur),

- Analyse der bestehenden Netz- und Fahrplansystematik,
- Analyse der Fahrpreis- bzw. Tarifsystematik für das zu untersuchende Gebiet,
- Analyse der Verkehrsnachfrage.

Diese Analysen bilden die Grundlage für die Identifizierung möglicher Anbindungen von Vororten bzw. dünn besiedelten städtischen Randbereichen innerhalb des Untersuchungsgebietes.

Des Weiteren wurden folgende wirtschaftliche Aspekte in die Analysen einbezogen:

- Analyse zur Produktionskostenstruktur im O-Bus-Verkehr,
- Analyse zur Produktionskostenstruktur im konventionellen Omnibusverkehr,
- Analyse zu Infrastrukturkosten im O-Bus-Verkehr.

Diese Datenbasis bildet die Grundlage für die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit bei möglichen Verlängerungsoptionen in Vororte. Die Grundlagen für die durchgeführten Analysen ergaben sich aus Daten der Barnimer Busgesellschaft mbH sowie allgemein zugänglichen statistischen Veröffentlichungen.

Das Material wurde im Hinblick in folgende Schwerpunkte aufbereitet und gegliedert:

- Allgemeine strukturelle Rahmenbedingungen,
- Bestehende Netz- und Angebotsstruktur,
- Tarif,
- Verkehrsnachfrage,
- Wirtschaftliche Rahmenbedingungen.

2.2 Strukturelle Rahmenbedingungen

2.2.1 Das Untersuchungsgebiet

Eberswalde ist die Kreisstadt des Landkreises Barnim nordöstlich von Berlin. Derzeit zählt Eberswalde ca. 41.000 Einwohner [Stand 2010]. Die Fläche beträgt ca. 93 km².

Eberswalde gliedert sich in folgende Stadtteile:

- Stadtmitte: ca. 12.600 Einwohner,
- Nordend: ca. 2.800 Einwohner,
- Ostend: ca. 3.100 Einwohner,
- Westend : ca. 4.800 Einwohner,
- Finow: ca. 8.400 Einwohner,
- Finowtal: ca. 7.100 Einwohner,
- Clara-Zetkin-Siedlung: ca. 1.000 Einwohner,
- Sommerfelde: ca. 400 Einwohner,
- Tornow: ca. 300 Einwohner,
- Spechthausen: ca. 100 Einwohner.

Aufgrund der wirtschaftlichen Situation besteht derzeit ein hoher Auspendleranteil (ca. 50 Prozent aller Beschäftigten) über den Landkreis Barnim hinaus. Einen stabilisierenden Faktor bildet die bestehende Fachhochschule in Eberswalde mit ca. 1.600 Studenten.

Untersuchungsrelevante Orte in der Umgebung sind zudem:

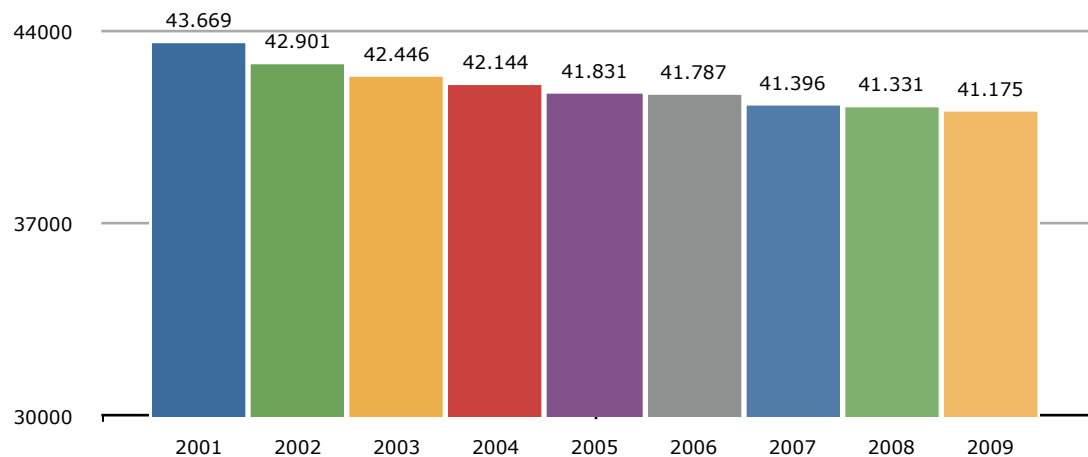
- Finowfurt: ca. 4.600 Einwohner,
- Joachimsthal: ca. 3.300 Einwohner,
- Oderberg: ca. 2.200 Einwohner,
- Britz: ca. 2.200 Einwohner.

Um Eberswalde herum liegen umfangreiche Waldgebiete. Ein touristischer Schwerpunkt im Umland ist das Schiffshebewerk Niederfinow. Hier werden jährlich ca. 500.000 Besucher gezählt.

2.2.1 Das Untersuchungsgebiet

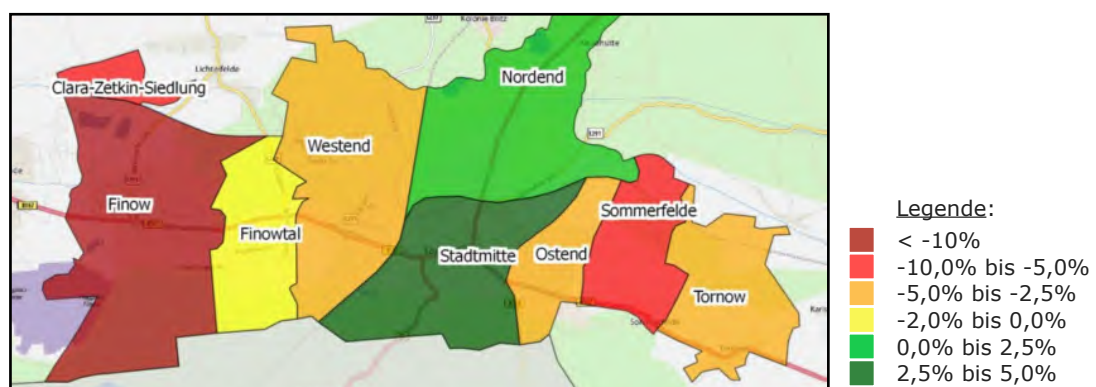
Die Stadt Eberswalde hat wie viele Städte im Osten Deutschlands aufgrund der strukturellen Umbrüche nach 1989 einen deutlichen Einwohnerrückgang zu verzeichnen. Im Jahre 1989 hatte Eberswalde (damals noch unter der Bezeichnung Eberswalde-Finow) mit etwa 55.000 die höchste Einwohnerzahl seiner Geschichte erreicht, die danach kontinuierlich sank.

Die nachfolgende Abbildung (Abbildung 1) verdeutlicht die Entwicklung der vergangenen 10 Jahre.



Teil A, Abb. 1: Entwicklung der Einwohnerzahl in Eberswalde seit 2009

Die stetige Abnahme zeigte zuletzt jedoch einen sich leicht verlangsamenen Trend (von 2001 bis 2005: -4,2%, von 2005 bis 2009: -1,6%).



Teil A, Abb. 2: Entwicklung der einzelnen Stadtteile in Eberswalde

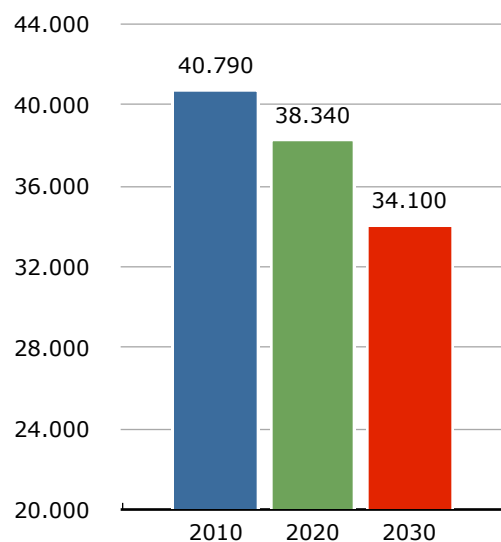
Bei einer Analyse der einzelnen Stadtteile von Eberswalde zeigen sich unterschiedliche Entwicklungen (siehe Abbildung 2). Auffallend ist eine Stabilisierung der Einwohner in der Innenstadt mit den Stadtteilen Stadtmitte und Nordend.

Besonders betroffen von Verlusten ist der Stadtteil Finow. Dabei ist speziell das Neubaugebiet Brandenburgisches Viertel mit einem Verlust von ca. -11% von Bedeutung.

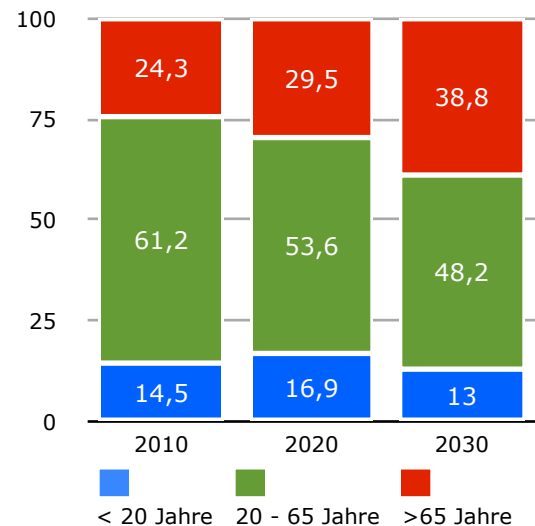
Der Trend der stetigen Abnahme der Einwohner bleibt bestehen und wird sich nach derzeitigen Prognosen ab 2020 weiter verstärken (siehe Abbildung 3). Für das Jahr 2030 wird für Eberswalde mit ca. 34.000 Einwohnern gerechnet (ca. -16% im Vergleich zum Jahr 2010).

Dabei ergibt sich gleichfalls eine Verschiebung der Altersstruktur in der Bevölkerung (siehe Abbildung 4). Damit verbunden ist eine sinkende Jugendquote und steigende Altersquote. Diese Entwicklungen sind jedoch im gesamten Bundesgebiet zu verzeichnen.

Der Anteil der älteren Bevölkerungsgruppen (ab 65 Jahre) an der Gesamtbevölkerung steigt bis zum Jahr 2030 von ca. 24 % auf ca. 38 %. Dagegen sinkt die Zahl der mittleren Jahrgänge von ca. 61 % auf ca. 48 %.



Teil A, Abb. 3: Einwohnerentwicklung Eberswalde bis 2030



Teil A, Abb. 4: Einwohnerentwicklung Altersstruktur Eberswalde bis 2030

2.3 Netz- und Angebotsstruktur

Das O-Busnetz in Eberswalde besitzt eine Streckenlänge von ca. 16 km. Darauf werden ca. 700.000 Fahrplankilometer im Jahr erbracht. Es verkehren 2 Linien, die insgesamt 6 der 9 bestehenden Stadtteile in Eberswalde erschließen. Alle wesentlichen Siedlungsschwerpunkte sind damit an das O-Bussystem angebunden.

Daneben sind für den Stadtverkehr 3 Dieselbuslinien von Relevanz. Der Verlauf der einzelnen Linien im Stadtnetz ist in Abbildung 5 dargestellt.

Im Einzelnen verkehren folgende Linien im O-Bus-Netz:

- Linie 861: Nordend – Am Markt – Kleiner Stern – Brandenburgisches Viertel,
- Linie 862: Ostend – Am Markt – Brandenburgisches Viertel – Kleiner Stern.

Für beide Linien wird Werktags (Montag – Freitag) folgendes Taktangebot vorgehalten:

- Hauptverkehrszeit (HVZ): 12 min (Schulzeit)/15 min (Ferien),
- Nebenverkehrszeit (NVZ): 15 min bzw. 30 min,
- Schwachverkehrszeit (SVZ): 60 min.

An Wochenenden und an Feiertagen erfolgt nachfolgendes Angebot:

- Nebenverkehrszeit (NVZ): 30 min bzw. 60 min,
- Schwachverkehrszeit (SVZ): 60 min.

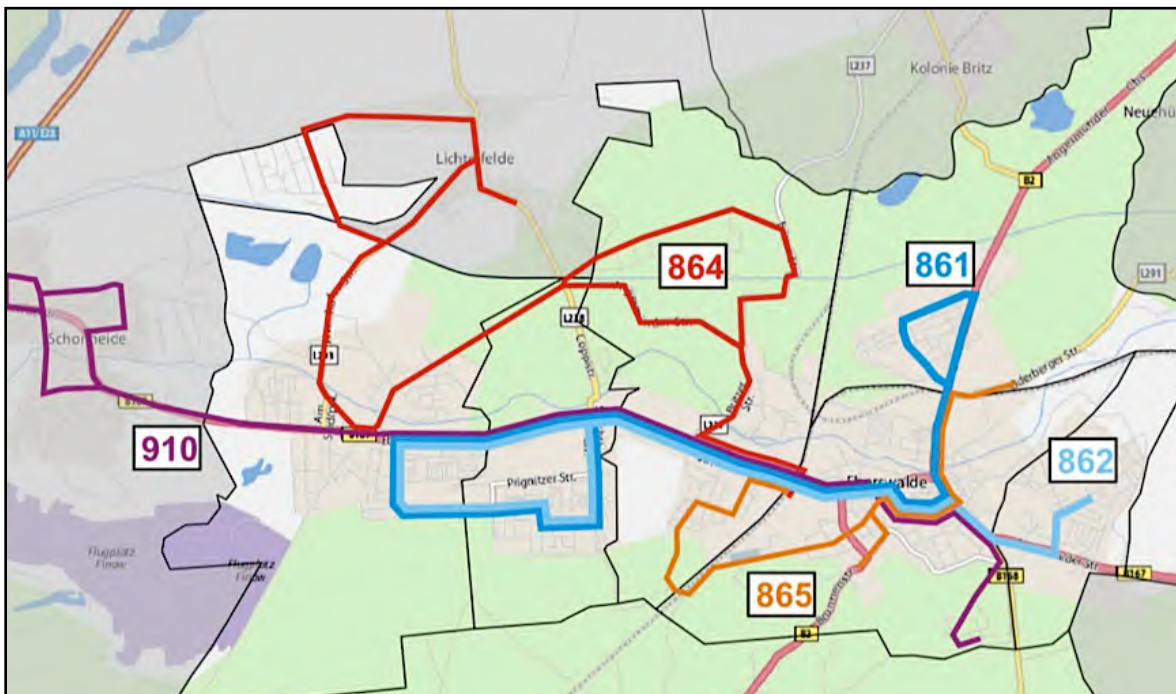
Die durchschnittlichen Haltestellenabstände liegen bei 485 m (Linie 861) und 470 m (Linie 862). Dabei werden 33 der bestehenden Haltestellen durch beide Linien bedient (ca. 85% aller O-Bus-Haltestellen), wodurch sich für den größten Teil des Netzes entsprechende Taktverdichtungen ergeben.

Ergänzend zum O-Bus-System sind für den Stadtverkehr folgende Dieselbuslinien relevant:

- Linie 864: Busbahnhof – Kaufland/TGE – Lichterfelde – Clara-Zetkin-Siedlung,
- Linie 865: Busbahnhof – Zoo – Wald-Solar-Heim – Gropius-Krankenhaus,
- Linie 910: Eberswalde – Finowfurt.

Diese Linien verkehren überwiegend im 60-Minuten-Takt. Die Linie 910 wird in der HVZ auf 30 Minuten verdichtet. Derzeit (Stand 2010) sind in Eberswalde 17 O-Busse (14 Alt- und 3 Neufahrzeuge) im Einsatz.

Die Beschaffung von insgesamt 9 weiteren Neufahrzeugen ist geplant. Der Anteil des O-Busverkehrs an den gesamten Fahrplankilometer-Leistungen der Barnimer Busgesellschaft beträgt 14,4 %.



Teil A, Abb. 5: Linienverkehr Stadtverkehr Eberswalde

2.4 Tarif

Eberswalde ist Mitglied im Tarifverbund des Verkehrsverbund Berlin-Brandenburg GmbH (VBB). Für den O-Bus in Eberswalde gilt ein Stadtverkehrstarif mit folgenden wesentlichen Eckpunkten (Stand 2010):

- Einzelfahrausweis: 1,30 € (ermäßigt 1,00 €),
- Tageskarte: 2,90 € (ermäßigt 2,20 €),
- Mehrfahrtenkarte (6 Einzelfahrten): 7,00 € (ermäßigt 5,00 €),
- Kleingruppenkarte (max. 5 Personen): 6,70 € (ohne Ermäßigung),
- 7-Tages-Karte: 9,80 € (ermäßigt 7,20 €),
- Monatskarte: 30,00 € (ermäßigt 22,50 €),
- 9-Uhr-Karte: 25,30 € (ohne Ermäßigung),
- Jahreskarte: 291,00 € (ermäßigt 218,30 €),
- Jahreskarte Abonnement: 300,00 € (ermäßigt 225,00 €),
- 9-Uhr-Jahreskarte: 245,50 € (ohne Ermäßigung),
- 9-Uhr-Jahreskarte Abonnement: 253,00 € (ohne Ermäßigung).

Von Interesse für diese Untersuchung sind weiterhin Preisstufen in solche Vororte bzw. benachbarte Gemeinden, welche für eine Erweiterung des O-Bus-Systems in Frage kommen.

Dabei sei nachfolgend auf den Einzelfahrausweis der wesentlichen Ziele im Vor-Ort-Verkehr verwiesen:

- Britz: 1,40 € (ermäßigt 1,10 €),
- Finowfurt: 1,40 € (ermäßigt 1,10 €),
- Niederfinow: 2,10 € (ermäßigt 1,50 €),
- Oderberg: 3,40 € (ermäßigt 2,50 €).

2.5 Verkehrsnachfrage

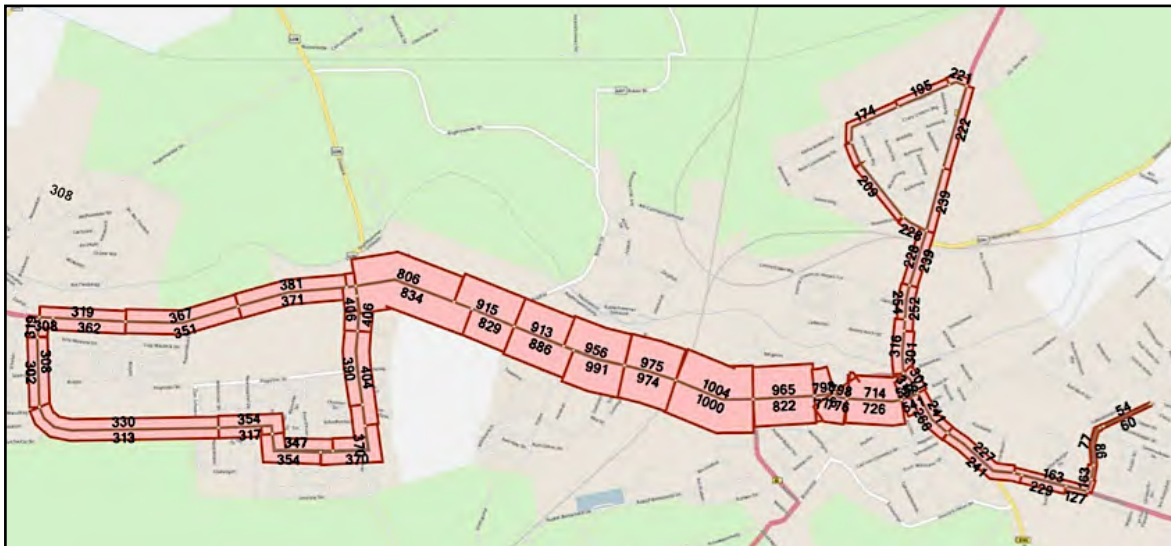
Der O-Bus Eberswalde befördert im Jahr ca. 3,5 Mio. Fahrgäste. Die Verteilung der Nachfrage im Netz ist in Abbildung 6 zu entnehmen.

Innerhalb des städtischen Siedlungsbandes ergibt sich eine relativ gleichmäßige Nachfrage, die nur in Richtung der Endpunkte Nordend und Ostend abfällt.

Die höchsten Belastungen ergeben sich dabei ausgehend von der Haltestelle ZOB/Hauptbahnhof. Hier besteht insgesamt auch das höchste Fahrgastaufkommen.

Die Haltestellen mit der höchsten Frequentierung sind:

- ZOB/Hauptbahnhof: ca. 820.000 Ein- und Aussteiger im Jahr,
- Am Markt: ca. 638.000 Ein- und Aussteiger im Jahr,
- Karl-Marx-Platz: ca. 569.000 Ein- und Aussteiger im Jahr.



Teil A, Abb. 6: Verkehrsnachfrage Stadtverkehr Eberswalde p.a. (Kantenbelastung O-Bus im Status quo 2007 - 1.000 Fahrgäste/Jahr)

2.6 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Für die Einordnung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zum Betrieb eines O-Bus-Systems ist für den Untersuchungsraum ein Vergleich der wesentlichen Kosten und Kenngrößen für O-Bus und Dieselbus sinnvoll.

Diese Eckdaten werden in den folgenden Tabellen zusammengefasst und bilden die Grundlage für die weitere Untersuchung. Dabei wurden in einem ersten Schritt nur die unmittelbar vergleichbaren Eckdaten herausgearbeitet. Investitionskosten in die Infrastruktur des O-Busses wurden aus methodischen Gründen zunächst ausgeklammert. Hierzu erfolgen nähere Betrachtungen bei den Variantenuntersuchungen in Kapitel 3.

Die Datenbasis beruht auf Berechnungen der Barnimer Busgesellschaft. Die Kosten für den O-Bus ergeben sich für den bestehenden Betrieb. Die Kosten für den Dieselbus wurden fiktiv, entsprechend erforderlichen Leistungen bei Ersatz des O-Busses, angepasst. Grundlage für den O-Bus bildet der dreiachsige Niederflur-Gelenk-O-Bus NGE 152 M des Herstellers MAN.

	EINHEIT	SOLOBUS	GELENKBUS	GELENK-OBUS
Fahrzeu glänge	m	12	18	18
Platzkapazität	Platz	ca. 82	ca. 119	ca. 119
- Sitzplatz	Sitzplatz	ca. 35	ca. 52	44
- Stehplätze (4 Personen/m²)	Person	ca. 47	ca. 67	ca. 75
Energieverbrauch (Fahrzeug)		40 l/100 km	55 l/100 km	2,6 kWh/km
Abschreibung (Fahrzeug) pro Jahr	T€/Fz*a	22	29	37,8
Instandhaltung & Energie (Fahrzeug) pro Fz-km	€/Fz*Fz-km	0,75	0,98	0,81
- Energiekosten	€/Fz*Fz-km	0,40	0,55	0,36
- Instandhaltungskosten	€/Fz*Fz-km	0,35	0,43	0,45

Teil A, Tabelle 1: Eckdaten Fahrzeug

Die veranschlagten Eckwerte zum Energieverbrauch ergeben sich aus Durchschnittswerten der Barnimer Busgesellschaft. Der Verbrauch von 2,6 kWh für den O-Bus ergibt sich einschließlich angenommener Rückspeisung. Mit dem von der Barnimer Busgesellschaft begonnenen Beschaffungsprogramm von Neufahrzeugen des Typs "Trollino 18" des Herstellers Solaris ist mit einer Senkung des Energieverbrauchs zu rechnen. Hierzu liegen aber noch keine verwertbaren Angaben vor.

	EINHEIT	SOLO-DIESELBUS	GELENK-DIESELBUS	GELENK-OBUS
Personalkosten	€/Ps*h	18,00	18,00	18,00
Energiekosten (Diesel, netto)	€/l	1,00	1,00	-
Energiekosten (Strom)	€/kWh	-	-	0,14
Instandhaltung Fahrzeuge	€/km	0,35	0,43	0,45
Unterhaltung Infrastruktur	€/km	-	-	0,026
Anschaffung Fahrzeuge	€/Fz	220.000	290.000	680.000
Abschreibungsdauer	Jahre/Fz	10	10	18

Teil A, Tabelle 2: Vergleich Betriebs- und Investitionskosten (allgemein)

Im Vergleich zum Dieselbus sind die Anschaffungskosten eines O-Busses deutlich höher anzusetzen. Dies relativiert sich aber aufgrund der längeren Lebensdauer und der höheren Laufleistung eines O-Busses. Insbesondere aufgrund des geringeren Verschleißes beim Antriebssystem ergibt sich für den Betrieb in Eberswalde eine Abschreibungsdauer von 18 Jahren im Vergleich zu 10 Jahren bei Dieselbus.

	O-BUS	DIESELBUS
Energie/Diesel	264.000 €	442.600 €
Fahrer	keine Kostenunterschiede	
Wartung Fahrzeuge	80.000 €	72.000 €
Personal Werkstatt	keine Kostenunterschiede	
Personal Fahrleitung	126.000 €	- €
Wartung Fahrleitung	19.000 €	- €
Fahrzeugversicherung	48.000 €	24.000 €
Investitionskosten Fahrzeug bei Abschreibungszeitraum	37.800 € 18 Jahre	31.000 € 10 Jahre
Sonstige Kosten	keine Kostenunterschiede	
Differenz	+ 5.200 €	

Teil A, Tabelle 3: Vergleich Betriebs- und Investitionskosten (allgemein)

Es wird deutlich, dass der O-Bus insbesondere im Bereich Wartung und Instandhaltung Nachteile zum Dieselbus aufweist. Die Vorteile liegen hingegen im Bereich der Kosten für den Energieverbrauch. Für Eberswalde besteht, trotz des relativ kleinen Gesamtnetzes, bezogen auf die jährlich vergleichbaren Betriebs- und Instandhaltungskosten kein grundlegender Kostenunterschied zwischen O-Bus und Dieselbus.

3. Varianten Netzerweiterung Eberswalde

3.1. Grundlagen

Schwerpunkt der Untersuchung ist die Überprüfung von Möglichkeiten der Netzerweiterung von O-Bus-Systemen in Vororte am Beispiel der Stadt Eberswalde. Dabei sollen Chancen und Grenzen beim Einsatz bzw. der Netzerweiterung betrachtet werden.

Für den Untersuchungsraum ergeben sich zwei grundlegende Erweiterungsoptionen, die nachfolgend genauer untersucht wurden. Diese gliedern sich in:

- Option A: Netzerweiterung in städtische Randbereiche (Abschnitt 3.2),
- Option B: Netzerweiterung Vororte (Abschnitt 3.3).

Jeder Option sind verschiedene Einzelvarianten zugeordnet. Diese entwickelten Varianten werden erläutert und bewertet.

Dabei sind grundlegend folgende Schritte bearbeitet worden:

- Festlegung Betriebskonzept,
- Ermittlung Fahrzeugbedarf,
- Ermittlung Fahrplankilometer,
- Abschätzung der Investitions- und Betriebskosten.



3.2 Option A: Netzerweiterung in städtische Randbereiche

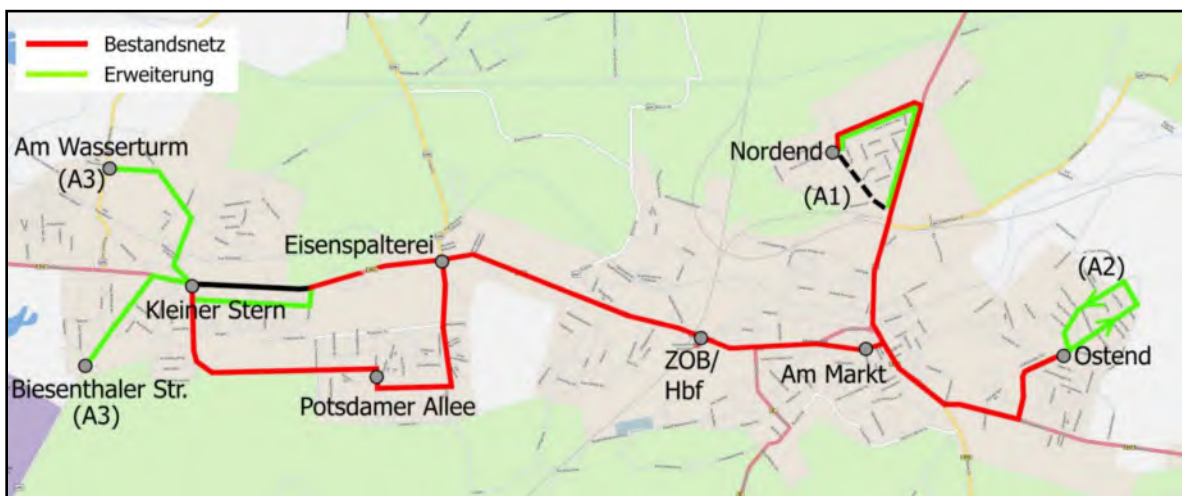
Option A beinhaltet Netzerweiterungen in städtische Randbereiche Eberswaldes. Dazu werden in der Grundvariante insgesamt 3 Erweiterungen betrachtet. Variante A2 beinhaltet aufbauend auf A1 eine zusätzliche Erweiterung.

3.2.1 Grundvariante

Für die Grundvariante ergeben sich prinzipiell folgende Erweiterungsoptionen:

- (A1) Gebiet Nord: Auflösung Ringverkehr,
- (A2) Gebiet Ost: Einrichtung eines Ringverkehrs,
- (A3) Gebiet West: Verlegung in Fritz-Weineck-Straße, Weiterführung der Linien zum Wasserturm und Biesenthaler Straße.

Die einzelnen Maßnahmen sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Aufgrund der kleinteiligen Maßnahmen war eine konkrete Abschätzung der Verkehrsnachfrage mit der bestehenden Datenbasis nur bedingt möglich. Grundsätzlich wurde auf Analogieschlüsse und regionale Erfahrungswerte zurückgegriffen.



Teil A, Abb. 7: Netzerweiterung in städtische Randbereiche

(A1) Gebiet Nord: Auflösung Ringverkehr

Ziel der Überlegung im Gebiet Nord ist eine Auflösung des nur in eine Richtung betriebenen Ringverkehrs über die Poratzstraße. Die Haltestelle Rosengrund würde entfallen. Die anderen Haltestellen werden in beide Richtungen bedient und damit für den überwiegenden Teil der erschlossenen Fahrgäste attraktiver.

Für diese Maßnahme sind folgende Eckpunkte einzubeziehen:

- Takt: 12/15-Minuten (keine Änderung),
- Fahrzeugbedarf: keine Änderung,

- Fahrleitung:
 - Neubau Doppelfahrleitung 1,9 km (gegenwärtig nur einfach im Bestand),
 - Rückbau Fahrleitung Poratzstraße,
- Investitionskosten: ca. 500.000 € (Annahme: Fahrleitungsmasten vorhanden),
- Betriebskosten: keine Änderung,
- Geschätzte zusätzliche Verkehrsnachfrage: ca. 81.000 Fahrten p.a.

(A2) Gebiet Ost: Einrichtung eines Ringverkehrs

Ziel der Erweiterung im Gebiet Ostend ist eine bessere Erschließung des Gebietes durch eine Netzerweiterung mit einem Ringverkehr von ca. 1,7 km. Das Siedlungsgebiet wäre damit vollständig durch das O-Bus-System erschlossen.

Für diese Maßnahme sind folgende Eckpunkte einzubeziehen:

- Takt: 12/15-Minuten,
- Fahrzeugbedarf:
 - 12-Minuten-Takt: +1 (sonst keine Fahrzeitreserve),
 - 15-Minuten-Takt: kein Mehrbedarf,
- Fahrplan-km (Mehrbedarf): ca. 33.000 km/Jahr,
- Fahrleitung:
 - Neubau Einfachfahrleitung max. 1,7 km,
 - abhängig von Straßenführung, derzeit nicht möglich,
- Investitionskosten:
 - Fahrleitung: ca. 680.000 € (80 % Doppelfahrleitung),
 - Fahrzeug: 680.000 €,
- Betriebskosten pro Jahr (Mehrbedarf):
 - Energie: 12.000 €,
 - Personal: 37.000 €,
 - Wartung/Instandhaltung: 16.000 €,
 - Versicherung Fahrzeug: 4.000 €,
 - Betriebskosten gesamt/Jahr: + 69.000 €,
- Geschätzte zusätzliche Verkehrsnachfrage: ca. 62.000 Fahrten p.a.

(A3¹) Gebiet West: Verlegung in Fritz-Weineck-Straße

Eine Verlegung des O-Busses von der Eberswalder Straße in die Fritz-Weineck-Straße ermöglicht eine bessere Erschließung des dort befindlichen Wohngebiets.

Für diese Maßnahme sind folgende Eckpunkte einzubeziehen:

- Takt: 12/15-Minuten,
- Fahrzeugbedarf: keine Änderung,
- Fahrleitung:
 - Neubau Doppelfahrleitung 1,1 km,
 - Rückbau Fahrleitung Eberswalder Str. erforderlich,
- Investitionskosten: Fahrleitung 550.000 €,
- Betriebskosten: unverändert,
- Geschätzte zusätzliche Verkehrsnachfrage: ca. 44.000 Fahrten p.a.

(A3²) Gebiet West: Verlängerung Richtung Wasserturm

Im Bereich Wasserturm im Stadtteil Finow entstand in den letzten Jahren eine neue Wohnsiedlung mit Eigenheimen. Eine Verlängerung des O-Busses erschließt dieses Gebiet.

Für diese Maßnahme sind folgende Eckpunkte einzubeziehen:

- Takt: 12/15-Minuten,
- Fahrzeugbedarf: + 1 Fahrzeug (nur bei 12-Minuten-Takt),
- Fahrplan-km (Mehrbedarf): ca. 58.000 km/Jahr,
- Fahrleitung: Neubau Doppelfahrleitung 1,5 km,
- Investitionskosten:
 - Fahrleitung: ca. 750.000 €,
 - Fahrzeug: 680.000 €,
- Betriebskosten pro Jahr (Mehrbedarf):
 - Energie: 21.000 €,
 - Personal: 91.000 €,
 - Wartung/Instandhaltung: 28.000 €,
 - Versicherung Fahrzeug: 4.000 €,
 - Betriebskosten gesamt/Jahr: + 144.000 €,
- Geschätzte zusätzliche Verkehrsnachfrage: ca. 31.000 Fahrten p.a.

(A3³) Gebiet West: Verlängerung Biesenthaler Straße

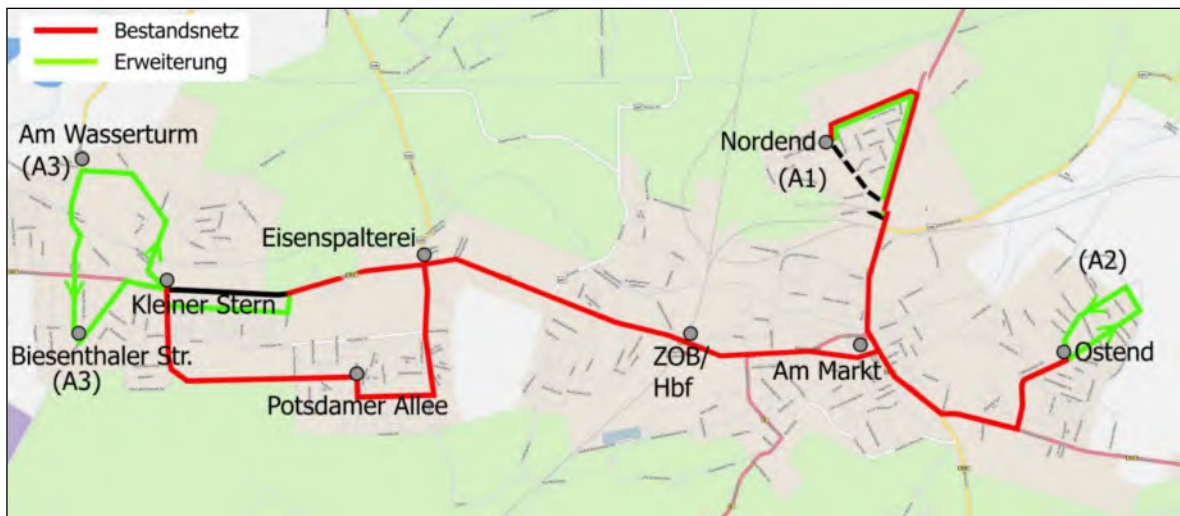
Die Verlängerung in die Biesenthaler Straße ermöglicht eine verbesserte Anbindung des alten Stadtkerns im Ortsteil Finow.

Für diese Maßnahme sind folgende Eckpunkte einzubeziehen:

- Takt: 12/15-Minuten,
- Fahrzeugbedarf: + 1 Fahrzeug (nur bei 12-Minuten-Takt),
- Fahrplan-km (Mehrbedarf): ca. 50.000 km/Jahr,
- Fahrleitung: Neubau Doppelfahrleitung 1,3 km,
- Investitionskosten:
 - Fahrleitung: ca. 650.000 €,
 - Fahrzeug: 680.000 €,
- Betriebskosten pro Jahr (Mehrbedarf):
 - Energie: 18.000 €,
 - Personal: 91.000 €,
 - Wartung/Instandhaltung: 24.000 €,
 - Versicherung Fahrzeug: 4.000 €,
 - Betriebskosten gesamt/Jahr: + 137.000 €,
- Geschätzte zusätzliche Verkehrsnachfrage: ca. 72.000 Fahrten p.a.

3.2.2 Ergänzungsvarianten

Die Ergänzungsvariante ergibt sich in Erweiterung der Variante A3. Sie beinhaltet die Verknüpfung der Erweiterungen Wasserturm und Biesenthaler Str. aus den Maßnahmen im Gebiet West zu einer Ringlinie (siehe Abbildung 8).



Teil A, Abb. 8: Netzerweiterung städtische Randbereiche - Zusatzvariante

Für diese Maßnahme sind folgende Eckpunkte einzubeziehen:

- Takt: 12/15-Minuten,
- Fahrzeugbedarf: + 2 Fahrzeuge (nur bei 12-Minuten-Takt),
- Fahrplan-km (Mehrbedarf): ca. 76.000 km/Jahr,
- Fahrleitung: Neubau Einfachfahrleitung 3,9 km,
- Investitionskosten:
 - Fahrleitung: ca. 1.560.000 € (80 % von Doppelfahrleitung),
 - Fahrzeug: 1.360.000 €,
 - Betriebskosten pro Jahr (Mehrbedarf):
 - Energie: 27.000 €,
 - Personal: 185.000 €,
 - Wartung/Instandhaltung: 36.000 €,
 - Versicherung Fahrzeug: 8.000 €,
 - Betriebskosten gesamt/Jahr: + 256.000 €,
- Geschätzte zusätzliche Verkehrsnachfrage: ca. 94.000 Fahrten p.a.

Zusammenfassend erscheint diese Variante aus verkehrlicher Sicht problematisch. Für die neu zu erschließenden Gebiete stellt "Kleiner Stern" ein erstes mögliches Fahrtziel dar. Durch Einführung einer Ringlinie werden die Fahrtzeiten für bestimmte Relationen im Nahbereich aufgrund des ausgedehnten Ringverkehrs jedoch unattraktiv.

3.2 Option B: Netzerweiterung in Vororte

Für die Untersuchung von Netzerweiterungen in weiter gelegene Vororte wurden für den Raum Eberswalde folgende Varianten geprüft:

- Variante B1: Verlängerung West: Kleiner Stern – Finowfurt (Abschnitt 3.3.1),
- Variante B2: Verlängerung Nord: Nordend – Britz (Abschnitt 3.3.2),
- Variante B3: Verlängerung Ost: Ostend – Niederfinow – Oderberg (Abschnitt 3.3.3).

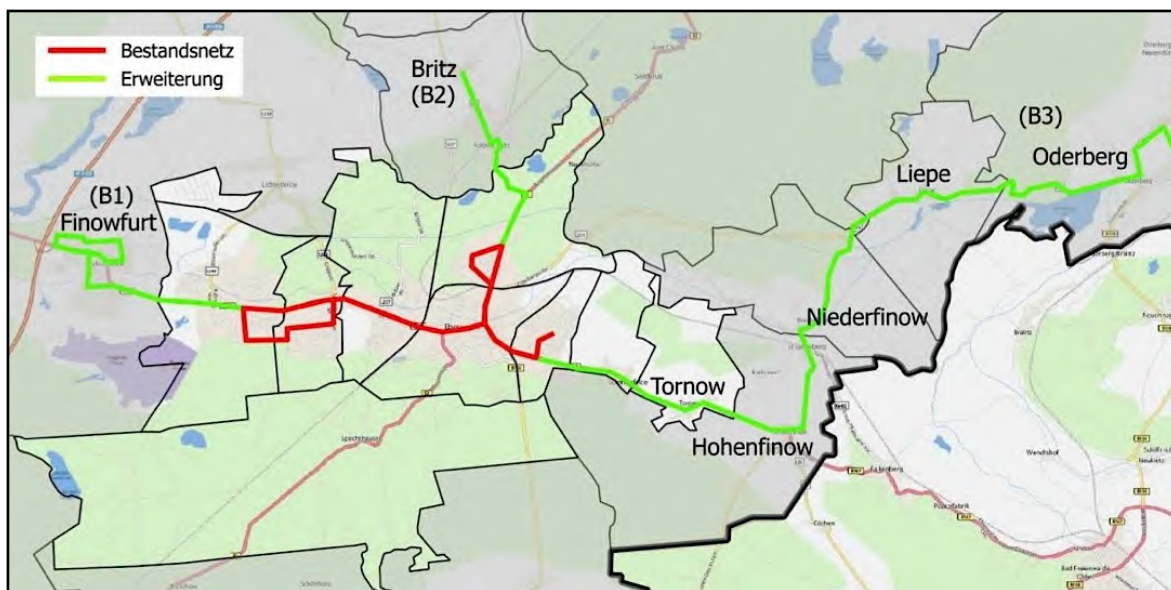


Abbildung 9: Netzerweiterung Vororte

(B1) Verlängerung West: Kleiner Stern – Finowfurt

Finowfurt ist mit ca. 4.600 Einwohnern die größte Ortschaft im Umkreis von Eberswalde. Eine Erweiterung des O-Busses in diese Richtung würde ein grundlegend neues Potenzial für das System erschließen. Die Neubaustrecke bis Finowfurt würde 8,6 km lang sein und dort als Ringlinie verkehren.

Für diese Maßnahme sind folgende Eckpunkte zu berücksichtigen:

- Takt: 30 Minuten,
- Fahrzeugbedarf: + 2 Fahrzeuge,
- Fahrplan-km: ca. 164.000 km/Jahr (05:00-22:00 Uhr),
 - Einsparung: Buslinie 910 Finowfurt – Eberswalde Busbahnhof, 2 Dieselbusse,
- Investitionskosten:
 - Fahrleitung: 3.900.000 € (4,6 km Doppel- und 4,0 km Einfachfahrleitung),
 - Fahrzeuge: 1.360.000 €,
 - Unterwerk: 1 (1,3 Mio. €),
- Betriebskosten pro Jahr:
 - Energie: 59.000 €,
 - Personal: 74.000 € (Ausdehnung Betriebszeiten),
 - Wartung/Instandhaltung: 78.000 €,
 - Versicherung Fahrzeug: 8.000 €,



- Betriebskosten gesamt/Jahr: 219.000 €,
- Geschätzte Fahrgastnachfrage auf den Erweiterungstrecken p.a.: 168.000 Fahrten.

(B2) Verlängerung Nord: Nordend – Britz

Britz besitzt als Vorort von Eberswalde ca. 2.200 Einwohner. Eine Verlängerung bis Britz, Dorf (ca. 5 km) würde gleichzeitig den Stadtteil Nordend für den O-Bus besser erschließen.

Für diese Maßnahme sind folgende Eckpunkte einzubeziehen:

- Takt: 60 Minuten,
- Fahrzeugbedarf: + 1 Fahrzeug,
- Fahrplan-km: ca. 62.000 km/Jahr,
 - Einsparung: Buslinie 922 Eberswalde Busbahnhof – Britz, 1 Dieselsebus,
- Investitionskosten:
 - Fahrleitung 2.500.000 €,
 - Fahrzeug: 680.000 €,
 - Unterwerk: 1 (1,3 Mio. €),
- Betriebskosten pro Jahr:
 - Energie: 23.000 €,
 - Personal: 37.000 € (Ausdehnung Betriebszeiten),
 - Wartung/Instandhaltung: 30.000 €,
 - Versicherung Fahrzeug: 4.000 €,
 - Betriebskosten gesamt/Jahr: 94.000 €,
- Geschätzte Fahrgastnachfrage auf den Erweiterungstrecken p.a.: 80.000 Fahrten.

Variante B3: Verlängerung Ost: Ostend – Niederfinow – Oderberg

Variante B 3 beinhaltet eine Neubaustrecke von Ostend bis Oderberg, Fontaneplatz von ca. 22 km. Dieses Konzept übersteigt die bisherigen Überlegungen hinsichtlich der unmittelbaren Anbindung von Vororten.

Die Strecke verläuft durch folgende Ortschaften:

- Tornow (ca. 200 Einwohner),
- Hohenfinow (ca. 500 Einwohner),
- Niederfinow (ca. 600 Einwohner),
- Liepe (ca. 800 Einwohner),
- Oderberg (ca. 2.200 Einwohner).

Damit werden insgesamt ca. 4.300 Einwohner erschlossen. Hinzu kommt eine Anbindung des Schiffshebewerkes Niederfinow mit derzeit ca. 500.000 Besuchern jährlich.

Für diese Maßnahme sind folgende Eckpunkte einzubeziehen:

- Takt: 60 Minuten,
- Fahrzeugbedarf: + 2 Fahrzeuge,
- Fahrplan-km: ca. 273.000 km/Jahr,
 - Einsparung: Buslinie 916 Eberswalde Busbahnhof – Oderberg, 2 Dieselsebuse,

- Investitionskosten:
 - Fahrleitung: 11.000.000 €, - Fahrzeuge: 1.360.000 €,
 - Unterwerk: 2 (2,6 Mio. €),
- Betriebskosten pro Jahr:
 - Energie: 98.000 €,
 - Personal: 73.000 € (Ausdehnung Betriebszeiten),
 - Wartung/Instandhaltung: 129.000 €,
 - Versicherung Fahrzeuge: 8.000 €,
 - Betriebskosten gesamt/Jahr: 308.000 €,
- Geschätzte Fahrgastnachfrage auf den Erweiterungstrecken p.a.: 307.000 Fahrten.

3.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend lassen sich für die Option A nachfolgende Eckdaten festhalten.

Variante/ Gebiet	Fahrzeugmehr- bedarf	Fahrplan-km/ Jahr (Mehrbedarf)	Investitions- kosten in EUR	Betriebskosten/ Jahr [€]	Geschätztes Nach- fragepotenzial [Fahrten p.a.]
Grundvariante					
A1 / Nord: Auflösung Ring- verkehr	keiner	2	500.000	0	ca. 81.000
A2 / Ost: Einrichtung Ring- verkehr	max. 1	33.000	1.360.000	69.000	ca. 62.000
A3 / West:					
Verlegung in Fritz-Weineck- Str.	keiner	keine	550.000	0 (gegenüber alter Strecke)	ca. 44.000
Verlängerung Wasserturm	1 (bei 12'-Takt)	58.000	1.430.000	144.000	ca. 31.000
Verlängerung Biesenthaler Str.	1 (bei 12'-Takt)	50.000	1.330.000	137.000	ca. 72.000
Ergänzungsvariante					
Ringlinie Wasserturm/Bie- senthaler Str.	2 (bei 12'-Takt)	76.000	2.920.000	256.000	ca. 94.000

Tabelle 4: Eckwerte Option A

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Optionen

- A1 Auflösung Ringverkehr Nord und
- A3 Verlegung O-Bus in die Fritz-Weineck-Straße

aufgrund der zu erwartenden Kostenparameter als sinnvoll eingeschätzt werden können. Da bei den Betriebskosten keine Mehraufwendungen entstehen, sind nur die langfristigen Investitionskosten zu berücksichtigen.

Der Ringverkehr Ostend (A2) ist aufgrund der hohen Investitionskosten nicht sinnvoll umsetzbar. Gleiches gilt für alle weiteren Varianten der Option A3 sowie der Ergänzungsvariante.

Für Option B sind die Ergebnisse in Tabelle 5 zusammengefasst.

GEBIET	FAHRZEUG-BEDARF	FAHRPLAN-KM/JAHR	INVESTITIONSKOSTEN IN €	BETRIEBSKOSTEN/JAHR IN €	GESCHÄTZTES NACHFRAGEPOTENTIAL (FAHRTEN P.A.)
B 1: West: Kleiner Stern - Finowfurt	2	164.000	6.560.000	219.000	168.000
B 2 Nord: Nordend - Britz	1	62.000	4.480.000	94.000	80.000
B 3 Ost: Ostend – Niederfinow - Oderberg	2	273.000	14.960.000	308.000	307.000

Tabelle 5: Eckwerte Option B

Aufgrund der hohen Investitionskosten im Vergleich zum relativ geringen zu erwartenden Aufkommen müssen alle drei Erweiterungsoptionen als kritisch eingeschätzt werden. Hinzu kommen die für den Betrieb eines O-Bus-Systems im Überlandverkehr ungünstigen Voraussetzungen:

- Geringere Höchstgeschwindigkeit als beim Dieselbus,
- Vorteile im Beschleunigungsverhalten sind aufgrund der großen Haltestellenabstände nicht gegeben.

Von daher ist insbesondere die Variante B3 problematisch, wobei hier bis Niederfinow durchaus ein verkehrliches Potenzial gegeben ist.

Allerdings ergeben sich bei Betrachtung der reinen Betriebskosten im Verhältnis zum geschätzten Aufkommen wirtschaftlich darstellbare Verhältnisse.

4. Kriterien für Erweiterungsoptionen

Im Hinblick auf eine Verallgemeinerung von Kriterien zur grundlegenden Einschätzung möglicher Erweiterungen von O-Bussen in Vororte soll zunächst ein kurzer Vergleich mit zugänglichen Daten der parallel geführten Untersuchung in Salzburg erfolgen. Darauf aufbauend erfolgt eine Ableitung möglicher verallgemeinerbarer Schwerpunkte.

4.1. Vergleich der Daten mit dem Partner Salzburg

Die Ausgangsdaten für einen Vergleich der Untersuchungsstädte Eberswalde und Salzburg bilden neben den bereits aufgezeigten Primärdaten für Eberswalde, Ergebnisse der Studie Verlängerung der Obus-Linie 4 nach Esch und Freilassung (PTV Planung Transport Verkehr AG im Auftrag Salzburger Lokalbahn – Stadtbus; 2011).

Die Untersuchung basiert auf den methodischen Rahmenbedingungen der Standardisierten Bewertung und enthält als weiteren Hauptteil die Ergebnisse einer Fahrgastbefragung. Von daher ist ein unmittelbarer Vergleich beider Untersuchungen nur bedingt möglich. Trotzdem lassen sich bestimmte Rahmendaten ableiten, die nachfolgend erläutert werden.

Für beide Städte lassen sich zunächst die nachfolgenden in Tabelle 6 zusammengefassten Eckdaten festhalten.

ECKDATEN	SALZBURG	EBERSWALDE
Einwohner	150.000	40.000
Streckenlänge	96 km	16 km
Anzahl der O-Buslinien	9	2
Anzahl der O-Busse	86	17
Fahrplankilometer p.a.	5,2 Mio.	0,7 Mio.
Fahrgäste p.a.	38,4	3,5 Mio.

Tabelle 6: Vergleich wesentlicher Daten

Aus den Eckdaten lassen sich schon aufgrund der unterschiedlichen Größe beider Untersuchungsgebiete nur bedingt Vergleiche anstellen. Eberswalde verzeichnet je Einwohner ca. 88 Fahrten in O-Bus-Netz pro Jahr. In Salzburg sind es dagegen ca. 256 Fahrten. Bezogen auf die vorhandene Streckenlänge kommen in Eberswalde ca. 219.000 Fahrgäste auf einen Streckenkilometer, in Salzburg sind dies 400.000. Aufgrund der unterschiedlichen städtischen Strukturen sind diese Unterschiede jedoch zu erwarten.

Im Hinblick auf die betrieblichen Rahmenbedingungen lassen sich nachfolgende Unterscheidungen festhalten.

	O-BUS IN SALZBURG	O-BUS IN EBERSWALDE	DIESELBUS SALZBURG (GELENKBUS)	DIESELBUS EBERSWALDE (GELENKBUS)
Energie/Diesel	0,21 €/km	0,36 €/km	0,66 €/km	0,55 €/km
Personal	28 €/h/P	18 €/h/P	28 €/h/P	18 €/h/P
Wartung Fahrzeuge	0,38 €/km	0,45 €/km	0,39 €/km	0,43 €/km
Investitionskosten je Fahrzeug und Jahr	30.500 €	37.800 €	33.300 €	29.000 €
Abschreibungszeitraum	22 Jahre	18 Jahre	12 Jahre	10 Jahre

Tabelle 7: Vergleich Kosten ausgewählter Positionen (IST-Zustand)

Zunächst ist festzuhalten, dass die durchschnittlichen Personalkosten in Salzburg deutlich über den Kosten in Eberswalde liegen. Trotzdem ergeben sich in der Wartung der Fahrzeuge Kostenvorteile für Salzburg, was grundlegend auf die Synergievorteile des deutlich größeren Betriebs in Salzburg schließen lässt.

Die Energiekosten ergeben sich überwiegend aus regionalen Besonderheiten, die nur bedingt beeinflussbar sind. Aufgrund der in Eberswalde durchgeführten kontinuierlichen Erneuerung der Fahrzeugflotte ist hier in den nächsten Jahren eine deutliche Kostenreduzierung zu erwarten (siehe Abschnitt 2.3).

4.2. Ableitungen

Aus den bestehenden ausgewerteten Analysedaten für Eberswalde und Salzburg lassen sich nur bedingt übertragbare Verallgemeinerungen auf andere Gebiete ziehen. Zu verschiedenen sind Aus-

gangssituation und strukturelle Rahmenbedingungen beider Städte. Trotzdem können einige grundlegende Aspekte herausgearbeitet werden, die eine erste Sicht auf die Sinnfälligkeit möglicher Optionen zur O-Bus Erweiterung in Vororte ermöglichen.

I. Allgemeine Bedingungen

Die einzubindenden Vororte sollten nicht zu weit vom Bestandnetz entfernt sein, da die bestehenden Investitionskosten für die Infrastruktur ein wesentliches Hindernis bei der Umsetzung bilden. Am günstigsten ist die Situation dann, wenn kein neues Unterwerk für den erweiterten Betrieb erforderlich wird.

II. Produktionsfaktoren O-Bus / Dieselbus

Bei der Produktion von Leistungen in O-Bus-Systemen lassen sich im Vergleich zum Dieselbus folgende wesentliche Produktionsfaktoren unterscheiden:

- Energie,
- Wartung Fahrzeuge,
- Investition Fahrzeuge,
- Personal.

Während sich die Personalkosten (Fahrer) zwischen O-Bus und Dieselbus nicht unterscheiden und die Wartungskosten beim O-Bus nur geringfügig höher sind, bestehen doch erhebliche Unterschiede bei den Fahrzeuginvestitionen und dem Energieverbrauch. Da die Energiebilanz beim O-Bus gegenüber dem Dieselbus wesentlich günstiger ist, andererseits die Fahrzeuginvestitionen höher liegen, bieten sich bei bestehenden O-Bus-Systemen besonders kurze aufkommensstarke Streckenverlängerungen bzw. -umverlegungen an. Diese wirken sich insbesondere dann auf die Produktionskosten positiv aus, wenn diese mit nur wenigen zusätzlichen Fahrzeugen möglich sind bzw. mit vorhandenen Fahrzeugen abgedeckt werden können (z.B. Streckenverlegung Eberswalde Fritz-Weineck-Str.).

III. Infrastruktur

Die Infrastrukturkosten setzen sich aus folgenden wesentlichen Eckpunkten zusammen:

- Fahrleitung,
- Unterwerk,
- Werkstatt.

Die größten Unterschiede bei den Infrastrukturkosten bestehen zwischen O-Bus und Dieselbus in der Notwendigkeit der Errichtung von Fahrleitungs- und Stromversorgungsanlagen ausschließlich für den O-Bus. Werkstattinvestitionen unterscheiden sich nur im geringen Maße, da sie sowohl für O-Bus und Dieselbus erforderlich sind.

Es kann aus den vorhandenen Ergebnissen abgeleitet werden, dass ein Ausbau eines vorhandenen O-Busnetzes nur dann Sinn macht, wenn die Streckenverlängerungen entweder sehr kurz sind und ohne zusätzliche Unterwerke auskommen oder bei größerem Streckenausbau der Fahrgastzuwachs so groß ist, dass er die zusätzlichen Investitionen in Unterwerke und Fahrleitungsanlage rechtfertigt. Erweiterungen hinsichtlich einer Art Überlandverkehr sind dabei kritisch zu sehen, da einerseits hohe Investitionskosten auftreten, der

O-Bus seine eigentlichen fahrdynamischen Stärken (Beschleunigung etc.) aufgrund der langen Haltestellenabstände nur bedingt zum Einsatz bringen kann.

IV. Verkehrsnachfrage

Über das erforderliche neue Verkehrsaufkommen lassen sich keine exakten Aussagen treffen. Hier gilt insgesamt ein Zusammenhang zwischen Investitionskosten, Produktionskosten und möglichen Substitutionskosten aus dem Dieselvorgängerbetrieb.

V. Verkehrsnachfrage

Ein wesentlicher Treiber für die Entwicklung unserer Verkehrssysteme sind die Aspekte Klimaschutz und Ressourcenschonung. Die immer knapper werdenden fossilen Energieträger stellen dabei ein zusätzliches Problem dar, das sich auch auf den öffentlichen Verkehr auswirken wird. Von daher werden elektrische Systeme zukünftig an Bedeutung gewinnen. Gerade hier ergeben sich für O-Bus-Systeme neue Chancen, bei denen auch die Investitionskosten vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit neu bewertet werden müssen.

4.3 Checkliste

Die nachfolgende Checkliste gibt eine Übersicht über erforderliche Informationen und Grundlagen, aus denen sich die Sinnfälligkeit einer möglichen O-Bus-Erweiterung ableiten lässt.

Dabei geht es nicht darum technische und wirtschaftliche Detailuntersuchungen zu ersetzen, sondern regionalen Entscheidungsträgern und Initiativen eine Liste erforderliche Rahmendaten und Prüfungsschritte an die Hand zu geben, mit denen die Prüfung eines Vorhabens begonnen werden kann. Dabei sind grundsätzlich nachfolgende Fragen und Aspekte zu prüfen bzw. in die Überlegungen einzubeziehen:

Handlungsfelder	Kriterien	Zielstellung
I. Konzeptionelle Rahmenbedingungen		
• Welche Erweiterung ist in die Überlegungen einzubeziehen? • Wo erfolgt der Anschluss an das bestehende Netz? • Wie sieht ein möglicher Linienverlauf aus? • Welche Linien im Dieseldienstverkehr verkehren auf dem geplanten Erweiterungsabschnitt? • Sind diese möglicherweise substituierbar oder in ihrem Verlauf veränderbar? • Welche rechtlichen Aspekte sind in die Überlegungen einzubeziehen? • Welche ökologischen Vorteile würde das Vorhaben bieten?		Abgrenzung der Maßnahme und Bestimmung der wesentlichen Rahmenbedingungen
II. Verkehrsnachfrage		
• Welche Verkehrsnachfrage besteht auf dem Erweiterungsabschnitt derzeit für die bestehenden Linien im Dieseldienstverkehr? • Lässt sich durch den O-Bus eine bessere Erschließung der vorhandenen Siedlungsstruktur erwarten? • Können Nachfragepotenziale für den Öffentlichen Verkehr zusätzlich erschlossen werden?		Einschätzung zu den zu erwartenden Nachfragepotenzialen

III. Betriebliche Rahmenbedingungen	
• Welche konkrete Linie bzw. welche Linien sollen den Erweiterungsabschnitt befahren? • Welches Angebot (Takt) ist für die Erweiterung vorzuhalten? • Ergibt sich daraus ein Fahrzeug- und oder Personalmehrbedarf? • Welche Kosten ergeben sich daraus? • Wie viel zusätzliche Fahrplankilometer ergeben sich daraus? • Können gleichzeitig Leistungen im konventionellen Dieselverkehr eingespart werden?	Überblick der zu erwartenden betrieblichen Leistungsparameter und der damit verbundenen Kosten für Fahrzeuge, Personal und Betrieb
IV. Infrastrukturelle Erfordernisse	
• Welche infrastrukturellen Anpassungen sind vorzunehmen? • Welche Kosten ergeben sich für: - Fahrleitung? - Unterwerk? - Haltestellen? - Sonstige Maßnahmen (z.B. neue Wendeschleifen)?	Abschätzung des zu erwartenden Investitionsbedarfs
V. Tarif und Erlöse	
• Sind tarifliche Rahmenbedingungen zu beachten? • Welche Erlöse sind zu erwarten?	Überblick über zu erwartende Einnahmen
VI. Gesamteinschätzung	
• Gesamtentscheidung der Sinnfälligkeit abgeleitet aus den Parametern - erzielbare Verkehrsnachfrage und Erlössituation - voraussichtlichen Betriebskosten - voraussichtliche Investitionskosten.	

Tabelle 8: Checkliste

5. Zusammenfassung

Im Rahmen des EU-Projektes Trolley – Promoting Electric Public Transport (WP4) erfolgte innerhalb dieser Studie die Untersuchung von Verkehrsgebieten hinsichtlich der möglichen Erweiterung von O-Bus-Netzen.

Dabei stand das O-Bus-System der Barnimer Busgesellschaft mbH, welches in Eberswalde betrieben wird, im Mittelpunkt der Betrachtungen. Im Zusammenhang mit parallel laufenden Untersuchungen in Salzburg, erfolgte ein Abgleich der dort zugänglichen Rahmendaten.

Grundlegend wurden dabei folgende Themenfelder betrachtet:

- Analyse des O-Bus-Systems in Eberswalde,
- Darstellung bestehender wirtschaftlicher Kennziffern,
- Untersuchung von Varianten der Netzerweiterung in Eberswalde,
- Vergleich der Rahmendaten Salzburg und Eberswalde,
- Zusammenfassung verallgemeinerbarer Kriterien.

Ein Vergleich zwischen den Systemen in Salzburg und Eberswalde lässt sich aufgrund der unterschiedlichen Systemgrößen nur bedingt durchführen. Trotzdem sind bei den wesentlichen Eckpunkten Übereinstimmungen festzustellen.

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass O-Bus-Systeme bereits bei mittleren Fahrleistungen günstiger zu betreiben sind, als vergleichbare Systeme mit Dieselmussen. Die zukünftige Entwicklung der Energiepreise dürfte diese Situation in den kommenden Jahren weiter in Richtung O-Bus verschieben.

Wesentlicher Kostentreiber sind die Kosten der Infrastruktur. Die Erweiterung bestehender O-Bus-Netze muss daher vor diesem Hintergrund gesehen werden. Die Überlegungen für Eberswalde fokussieren sich dabei grundsätzlich auf die betriebswirtschaftlichen Voraussetzungen für Netzerweiterungen.

Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass sich durch eine Verbesserung des O-Bus- Systems die Attraktivität des ÖPNV insgesamt erhöht. Weiterhin reduzieren sich die Emissionen, insofern eine substituierende Umstellung vom Dieselmussen auf O-Bus Betrieb möglich ist.

Grundsätzlich gilt aber aufgrund der hohen Investitionskosten, dass bei Verlängerungen des O-Bus-Systems in Vororte ein entsprechendes Fahrgastpotenzial vorhanden sein muss bzw. eine betriebliche und wirtschaftlich günstige Einbindung besteht.







TEIL B (I)

Stationäre Energiespeichersysteme in Fahrleitungsnetzen von Nahverkehrsbahnen und O-Bussen



IVI

Im Auftrag der Barnimer Busgesellschaft erarbeitet durch:

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

Stationäre Energiespeichersysteme in Fahrleitungsnetzen von Nahverkehrsbahnen und O-Bussen

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 GmbH plant, im Fahrleitungsnetz der Stadt Eberswalde einen stationären Elektroenergiespeicher zu installieren, um die Rekuperationsrate von kinetischer und potenzieller Energie beim Abbremsen ihrer Obusse 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 zusammengeschalteten Anlagensystemen.

ART DER SPEICHERUNG	ANWENDUNG
mechanisch	• Pumpspeicherwerk • Druckluftspeicher • Schwunghmassenspeicher
chemisch	• Wasserstoff, Methan (durch Elektrolyse und ggf. nachfolgende Methanisierung)
elektrochemisch	• Batterien (z. B. Blei-Säure, NiCd, NiMH, Li-Ion oder Redox-Fluss-Batterien, Hochtemperatur-Batterien usw.)
elektrostatisch	• Kondensatoren, speziell Doppelschicht-kondensatoren • supraleitende magnetische Energiespeicher

ART DER SPEICHERUNG	ANWENDUNG
thermisch	Wärmespeicher (Wasser, Feststoffspeicher)
thermochemisch	Latentwärmespeicher (Systeme mit Phasenübergang z. B. zwischen fest und flüssig)

Tabelle: Anwendungen für verschiedene Arten der Energiespeicherung

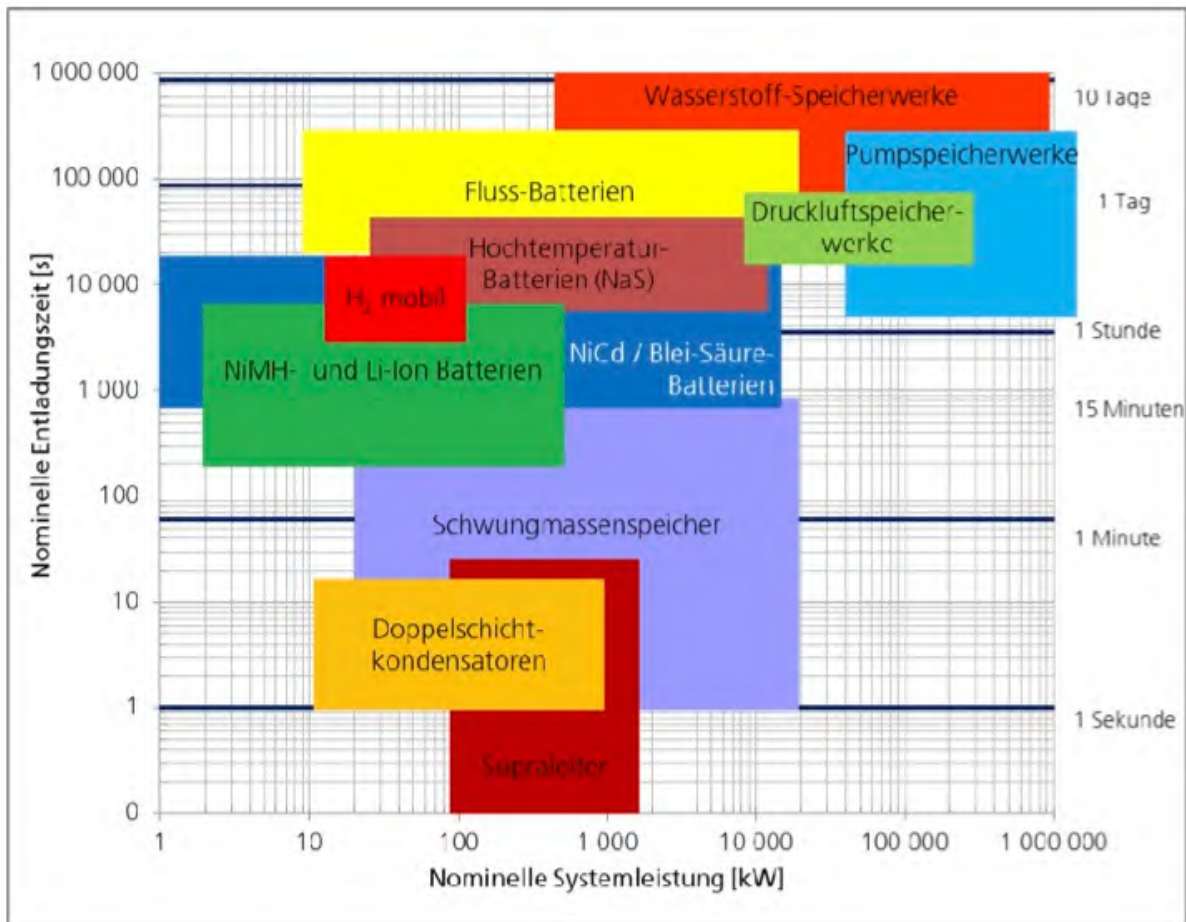


Abbildung: Einsatzbereiche verschiedener Speichertechnologien, klassifiziert nach Leistung und nomineller Entladungszeit Quelle: [Hannig 2009], S.24, eigene Darstellung

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. Beim Absinken der Netzspannung unter einen festgelegten Wert wird aus dem Speicher Energie zur Spannungstützung 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-/Ausspeicherwirkungsgrad 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 Energiezwischenspeicher 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 Prozesswärme 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 Rekuperati-

onsenergie 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 NiCd-Batterien für den Privatbereich nicht mehr zugelassen.

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 W und 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_{solar}. Weiterhin werden Batterien der gleichen Firma als Hausspeicher für Solaranlagen in Guadeloupe, Reunion angewendet.

In einer Pressemeldung vom 1. 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[®] 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 Energielangezeitspeicherung 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 geringe 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.¹

Grundlage sind Einheiten mit 7 kW Leistung. Allerdings ist auch zu erwähnen, dass

¹ Prudent Energie Corporation, Fallstudie Japan, www.pdenergy.com/pdfs/casestudy_japan.pdf, Zugriff v. 15. 4. 2011

eine Reihe geplanter Anlagen anderer Hersteller nicht oder nur in Prototypen realisiert 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.

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. 3 000 bis 5 000 Umdrehungen pro Minute), werden neuere Systeme aus hochfesten Faserverbundwerkstoffen (CFK) hergestellt und mit ca. 20 000 bis 60 000 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 Regelernergiereserve in Energieübertragungsnetzen zum Einsatz. So soll Anfang 2011 ein 20 MW Speicherwerk in Stephentown, NY ans Netz gehen, das mit 200 Schwungmassespeichern 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.

Schwungmassesysteme 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 Ummantelung des Systems vorgebeugt werden.

Schwungmassenspeicher 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

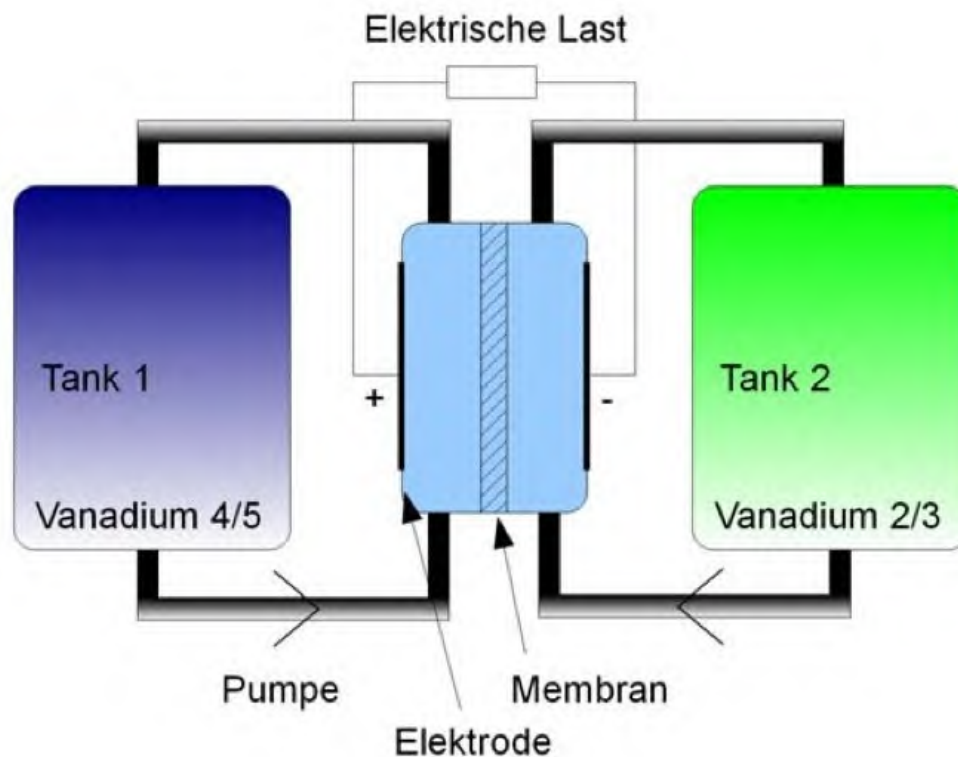


Abbildung 4: Prinzipskizze einer Vanadium-Redox- Fluss-Batterie

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 Schwungmassenspeicher 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 Schwungmassenspeicher 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 $3\,600\text{ min}^{-1}$ drehende Stahlschwungmasse 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 Spannungsstützung eingesetzt. In Auswertung von Langzeitmessungen konnten Einsparungen von rund 450 000 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 Schwungmassensystems waren neben der schnellen Reaktionszeit auch die relativ geringen Kosten. In [Steinhorst 2008] wurden nach ersten Betriebserfahrungen Einsparungen von über 430 000 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 Schwungmassenspeicher 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 25 000 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 500 000 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 Bahnherstel-

lern Siemens und Bombardier konfektionierte Systeme angeboten. Auch am Fraunhofer-Institut für Verkehrs und Infrastruktursysteme IVI wurde eine solche Anlage für Forschungsaufgaben 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 Speichereinhalts ist möglich.

Zwischen den Betriebsmodi Energiesparen und Spannungsstabilisierungen kann automatisch umgeschaltet werden. Der Wartungsaufwand sei geringer als bei Schwungmassensystemen. Von Siemens werden mögliche Energieeinsparungen von bis zu 500 000 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	Schwungmasenspeicher
Energiedichte [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)
Leistungsdichte [W/l]	100 - 140**	k.A.	k.A.	700 - 1000**	5**	Modul 10 - 50**	Modul 1000 - 2000** System 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*
spez. Investitionskosten [€/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 abhängig von Material und Drehzahl
	1000 - 2000*	k.A.	k.A.	1500 - 4000**	1500 - 4000*	k.A.	100 - 360* z.B. CFK 250##
max. Zyklenzahl (bei 80 % Entlادتiefe)	500 - 1000** 1200* BEWAG: ~7000 Nennladungszyklen	2000*	1000*	5000 Vollzyklen* 3000**	13000* 13000**	~500.000* ~500.000**	max. Zyklenzahl >1.000.000**
Zykleneffizienz (Wirkungsgrad)	75 - 80%* 75 - 85%*	60 - 80%* 70%####	70%*	90 - 95%* 90 - 95%**	75 - 80%* 75%**	85 - 95%* ca. 95%**	85 - 90%* 90 - 95%**
typische Anlagengrößen	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
Beispiele für Großanlagen	Herne (Solar): 1,2 MW, 1,2 MWh; BEWAG: 17 MW, 14 MWh	Fairbanks, Alaska: 2* 20 MW, ca. 6,5 MWh	keine Großanlagen 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 ****	Fahrleitungen: Köln, Bochum, Madrid, Peking, zeitweise: Portland, Dresden	Fahrleitungen: Hamburg Han- nover, Zwickau, MTA New York Energieversor- gung: New York 20 MW- Speicherwerk
Speicherverlust, Selbstentladung	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	Schwingungsmassenspeicher
Ansprechzeit	schnell <1 s**	schnell	schnell	schnell <1 s**	schnell <100 ms**	schnell <1 s**	schnell <1 s**
kalendari-sche Nut-zungsdauer	5–15 Jahre*	5–15 Jahre*	<5 Jahre*	10–15 Jahre*	15 Jahre*	8–10 Jahre*	~ 20 Jahre* (Lager: 5 – 7 Jahre**)
Technologie-verfügbar-keit	kommerziell	kommerziell	kommerziell	kommerziell, Großanlagen in Einführung	Prototypen, in Anfängen kommerziell	kommerziell, konfektionierte Lösungen für Fahrleitungsanlagen	kommerziell (USV), Einzelanwendungen für Fahrleitungsanlagen und Großanlagen
Risiken	gering - Elektrolyt ätzend - Explosionsgefahr durch austretende Gase	umweltschädlich - Elektrolyt ätzend - Explosionsgefahr durch austretende Gase - Cadmium und seine Dämpfe sind hochgiftig!	k.A.	gering für neuere Typen - Reaktionsfreudigkeit von Lithium - Explosions- und Brandgefahr bei Zerstörung, Überlastung, Überhitzung	gering - Säure - Vanadium kann toxisch wirken durch Auffangbecken sichern	gering Elektrolyte (Acetonitril) können toxisch und brennbar sein	gering Verletzungsgefahr durch Bersten, wird durch entspr. Gehäuse verhindert

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

Stationäre Energiespeichersysteme in Fahrleitungsnetzen von Nahverkehrsbahnen und Obussen

Häufig besuchte Internetseiten:

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

Literatur

Beacon 2010: Beacon Power: 20 MW Frequency Regulation Plant, November 3, 2010, 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, 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.spinnovation.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, 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.bmw.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/speichertechniken-elektroenergie,property=pdf,bereich=bmw,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, 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, 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, Zugriff v. 20. 4.2011

Price, Anthony: 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, 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, 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, Zugriff v. 15.4.2011

Schäfer 2009: Schäfer, Tim, Li-Tec Battery Kamenitz/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, 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_p_i_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

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-sp09.pdf, Zugriff v. 14.4.2011

Täubner 2007: Täubner, Frank: Produktbeschreibung und Datenblatt – Energiespeicherwerk für Gleichstromnetze im Nahverkehr. www.rosseta.de/texte/bahnrsr.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 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
Leergewicht	t	19,6	
zulässiges Gesamtgewicht	t	28,0	
Beförderungskapazität	Pers.	121	
mittlerer Beladungszustand	-	1/3	Annahme
Nennleistung	kW	250	
Länge Wagenkasten	m	18,0	

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

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

Tabelle 2: Buslinien der Barnimer Busgesellschaft

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.

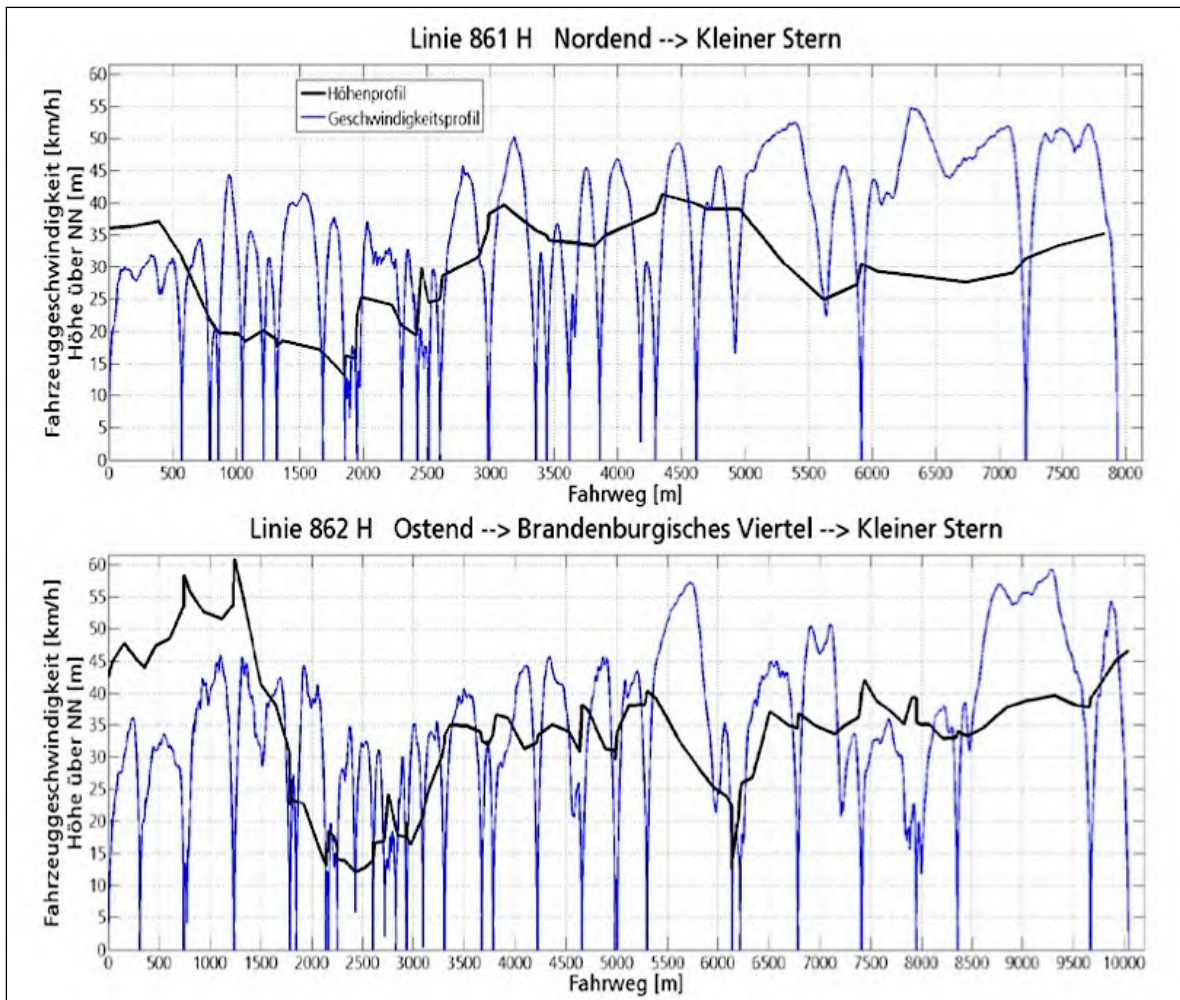


Abbildung 1: Höhen- und Geschwindigkeitsprofile über dem Fahrweg der Linien 861 und 862 der Barnimer Busgesellschaft

Wirkungsgrad Rad-Zwischenkreis

Die Leistungsübertragungsstrecke 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 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.

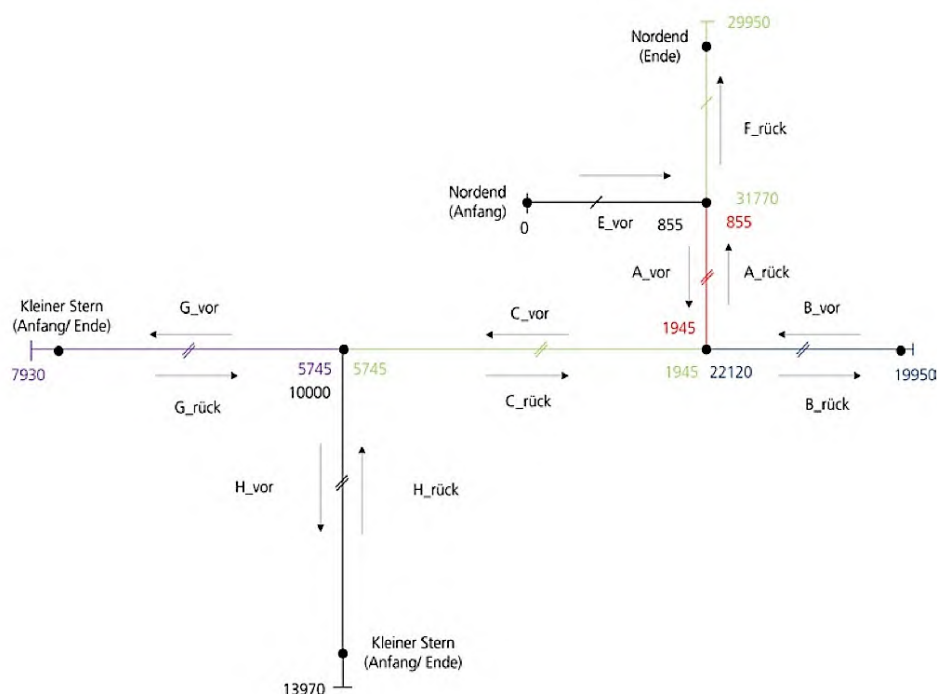


Abbildung 2: Streckenabschnitte Eberswalde mit gewählter Kilometrierung

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 mit Stand von 12/2005, die dem Fraunhofer IVI am 18.02.2012 zur Verfügung gestellt wurden. Das Oberleitungsnetz der Barnimer Busgesellschaft 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
OST	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	
	S3 Ost	MS 5	22000	314 m	
	S4 Ost	MS 6	20837	1470 m	
MITTE	S1 Mitte	MS 7	3465	1403 m	
	S2 Mitte	MS 8	4195	2135 m	
	S1 West	MS 9	5285	1762 m	
WEST	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	

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.

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

Tabelle 4: Netztrennstellen im Netz der Barnimer Busgesellschaft

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.

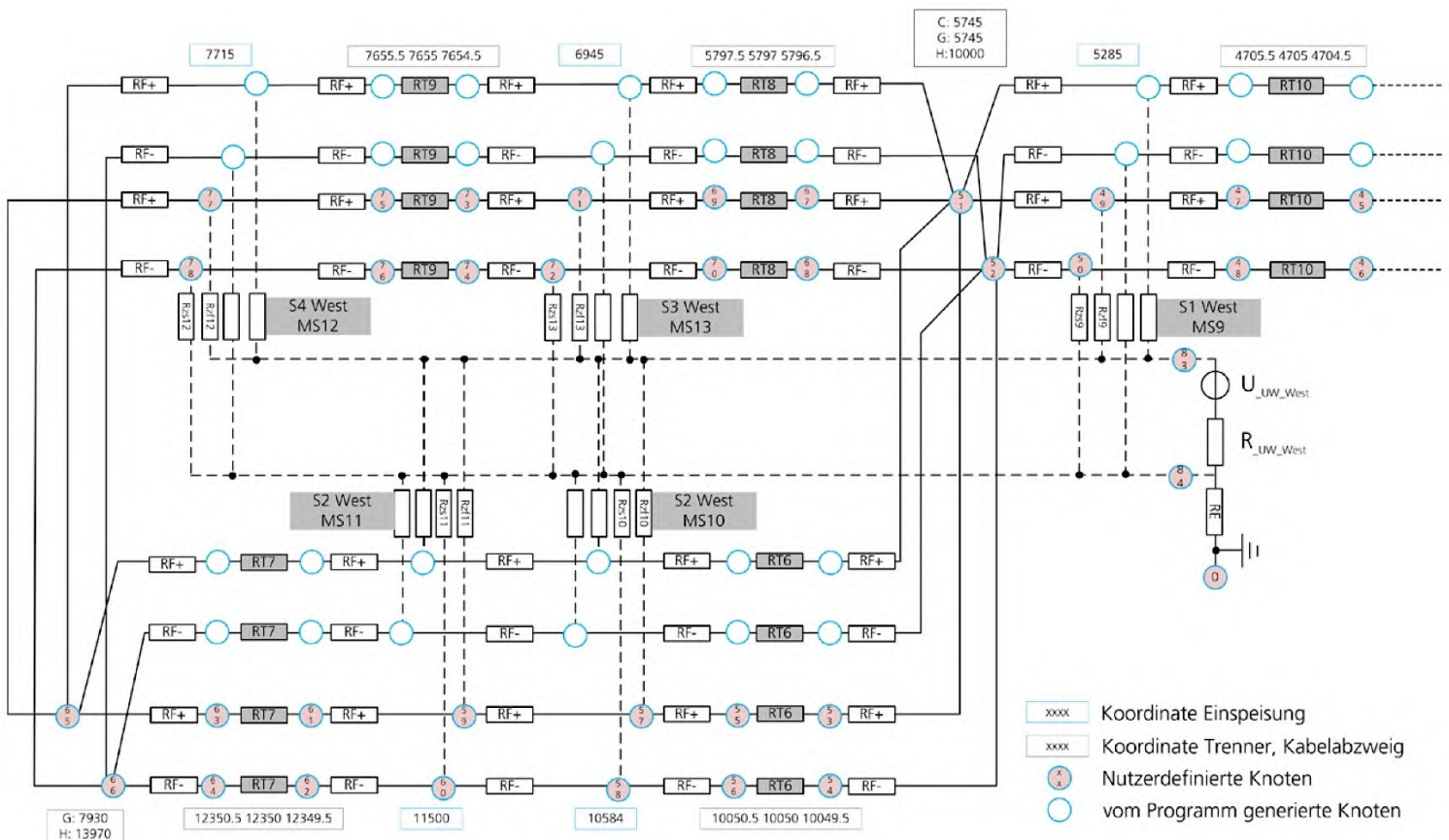


Abbildung 3: Ausschnitt des erstellten elektrischen Netzes (Teilbereich Unterwerk West)

Elektrische Widerstände

Die Zuleitungen zwischen den Unterwerken und den Einspeisepunkten sind erdverlegt und mit 500 mm² 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

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 Fahrplanszenarien 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



Abbildung 4: Definierte Streckenabschnitte über dem Fahrweg der Linien 861 und 862 der Barnimer Busgesellschaft

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 Fahr-szenarien 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). 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 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

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.

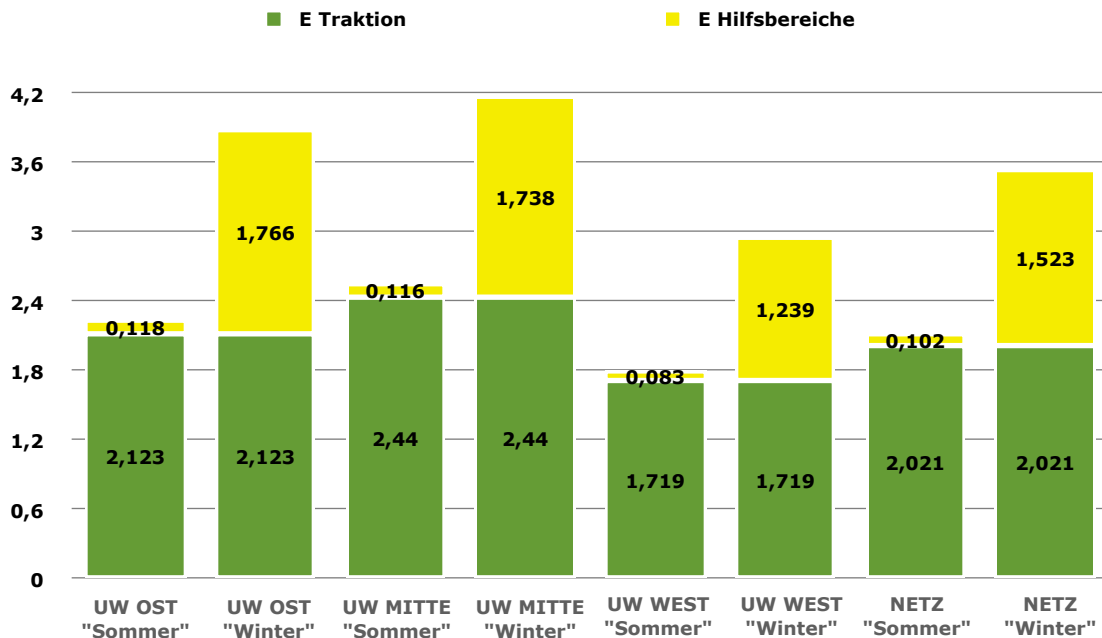


Abbildung 5: spezifischer Energiebedarf Sommer/Winter (getrennt nach UW-Bereichen und für das Gesamtnetz)

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

Erkenntnisse:

- Während der Streckenteil, welcher durch das Unterwerk West mit elektrischer Energie versorgt wird, durch einen unterdurchschnittlichen Traktionsenergiebedarf gekenn-zeichnet 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 zwi-schen 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 Un-terwerksbereichen (vgl. Tabelle 6) bedingen gleichzeitig einen unterschiedlichen spezi-fischen Energiebedarf zur Versorgung der Hilfsbetriebe.

Die Fahrgastraumheizung im Winterbetrieb verursacht einen deutlichen Anstieg des Fahr-zeugenergiebedarfs. Liegt der Anteil der Hilfsbetriebe am Gesamtenergiebedarf im Som-mer 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.

Tabelle 7 stellt den ermittelten Energiebedarfswerten 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 Netzbremung wird die Abgabe von Bremsenergie an andere Fahrzeuge und unter Hilfsbetriebsbremsung die Befriedigung von Hilfsenergiebedarf aus Bremsenergie auf dem bremsenden Fahrzeug verstanden.

			UW OST		UW MITTE		UW WEST		NETZ	
S Z E N A R I O 1	Energiebedarf		SO	WI	SO	WI	SO	WI	SO	WI
	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		SO	WI	SO	WI	SO	WI	SO	WI
	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	
S 2	Energiebedarf		SO	WI	SO	WI	SO	WI	SO	WI
	Traktion	[kWh/km]	2,132	2,132	2,440	2,440	1,719	1,719	2,021	2,021

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	
S Z E N A R I O	Energiebedarf		SO	WI	SO	WI	SO	WI	SO	WI
	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		SO	WI	SO	WI	SO	WI	SO	WI
1		%	43,1	13,5	40,5	13,3	40,6	12,8	41,3	13,2
			UW OST		UW MITTE		UW WEST		NETZ	
S Z E N A R I O	Energiebedarf		SO	WI	SO	WI	SO	WI	SO	WI
	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		SO	WI	SO	WI	SO	WI	SO	WI
2	Unterwerk	%	46,3	17,8	41,9	16,9	43,2	16,9	43,7	17,2

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
Jahres-mittel	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	%	36,0	34,1	34,3	34,8

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

Tabelle 11: Energiesparpotential (monetär) durch den Einsatz stationärer Energiespeicher (Jahresmittel)



Betriebs

direkte Rückkehr
für Schülerbesucher



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 Energiespeicherklammenspannung 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

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	
Szenario 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
Szenario 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]	16,9	10,4	20,0	11,6	21,1	12,2	19,3	11,4

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.

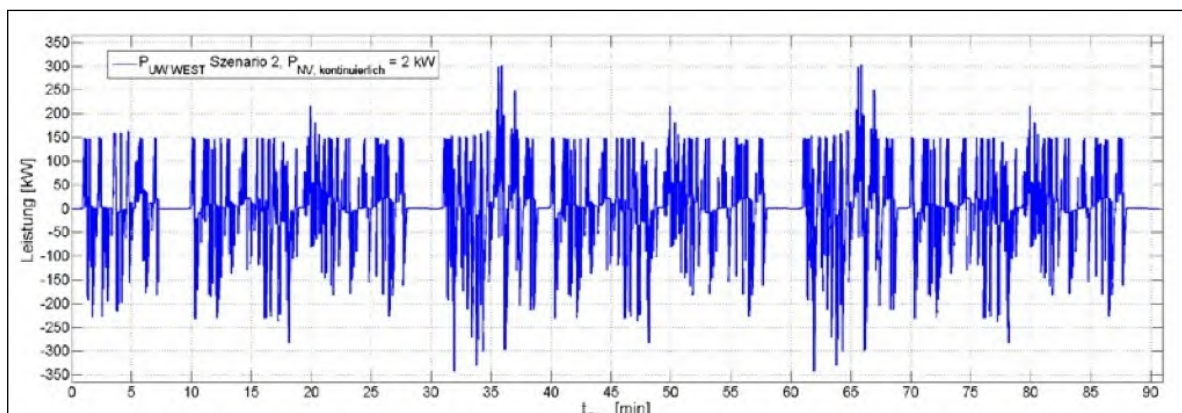


Abbildung 6: Speicherzyklus an der Klemme des ES am UW WEST

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.

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, Stellinduktivitäten, 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 Speicherspannungsniveau, 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 Energiespeichergrößen (Anzahl Einzelstränge) für die drei Unterwerksabschnitte sowie die ermittelten Verlustleistungsanteile und resultierenden Speicherwirkungsgrade zusammen.

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

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.

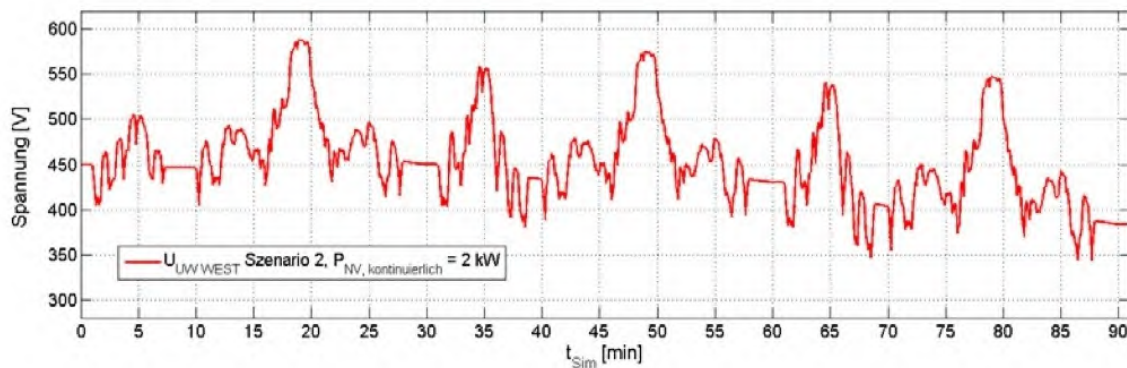


Abbildung 7: Spannung an der Klemme des ES über der Zeit für die ausgewählte Konfiguration

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. Bild 9 zeigt exemplarisch die resultierende Strombelastung des Energiespeichersystems am UW WEST. Die mittlere Strombelastung kann als unterkri- tisch hinsichtlich vorzeitiger Alterung der Superkondensatorzellen eingeschätzt werden.

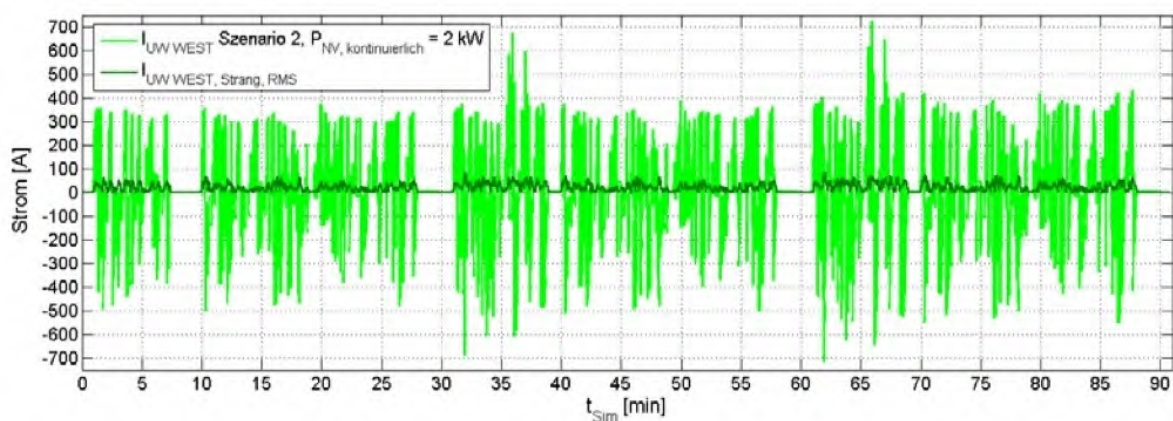


Abbildung 8: Strombelastung des Superkondensator-Energiespeichers (Klemmstrom und RMS-Wert Einzelstrang)

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.

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

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 (III)

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



IVI

Im Auftrag der Barnimer Busgesellschaft 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/I) 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/II) 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 ²	1,3	
maximale Bremsverzögerung	m/s ²	- 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	
Daten Fahrzeugenergiespeicher		LS Mtron	
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

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
Szenario 1	7:00	7:00	7:06	7:03
	7:12	7:12	7:18	7:15
	7:24	7:24	7:30	7:27
Szenario 2	9:30	9:24	9:15	9:15
	10:00	9:54	9:45	9:45
	10:30	10:24	10:15	10:15

Tabelle 2: ausgewählte Abschnitte des Fahrplans (Fahrscenarien)

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 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

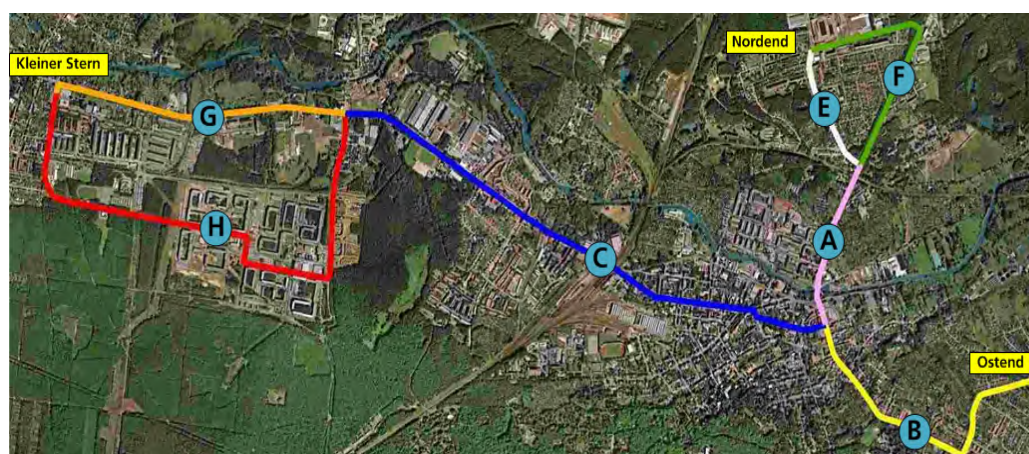


Abbildung 1: definiertes Streckenabschnitte über dem Fahrweg der Linien 861 und 862 der BBG

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 Hilfsbetriebsleistung 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). 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
Szenario 1	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
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

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)

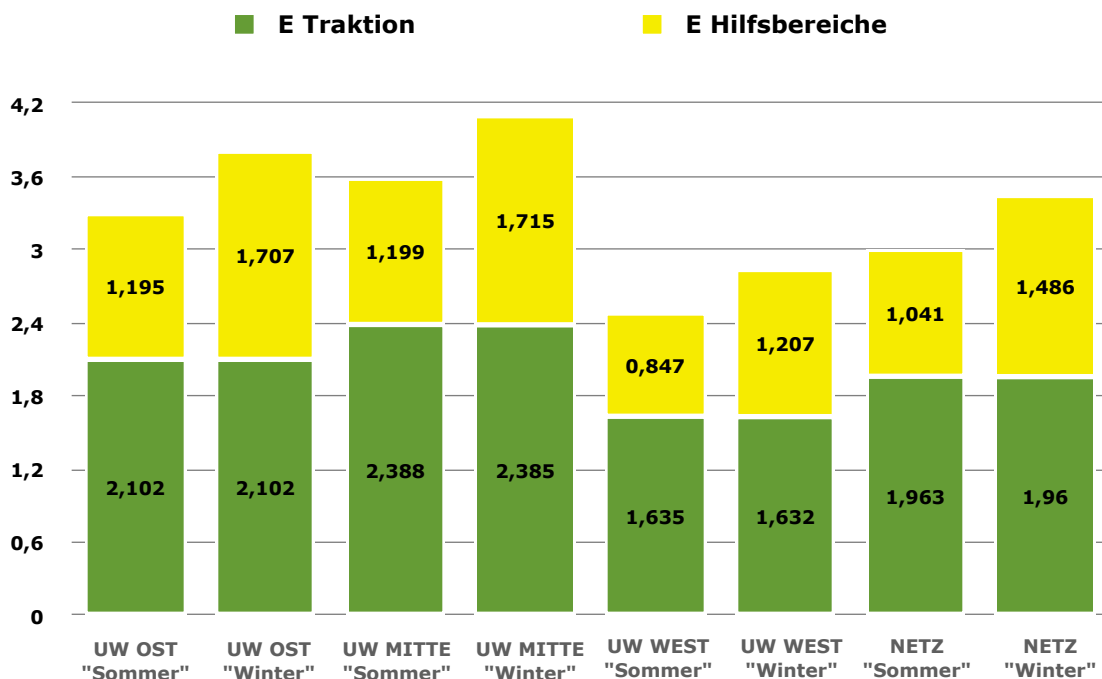




Abbildung 2 stellt die Energiebedarfskennwerte, getrennt nach Sommer- und Winterbetrieb, als gemittelte Werte beider Fahrscenarien dar.

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 %.

1.1.3 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 Fahrplanszenarien und getrennt nach „Sommer“ (SO) und „Winter“ (WI) gegenüber. Hierbei wurden die ermittelten Netzverluste dem Energiebedarf zugeordnet. Unter Netzbremse wird die Abgabe von Bremsenergie an andere Fahrzeuge und unter Hilfsbetriebsbremsung 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
	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
	Netzbremung	[kWh/km]	0,340	0,347	0,470	0,486	0,133	0,146	0,279	0,291
	Bremung 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
	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
	Netzbremung	[kWh/km]	0,308	0,305	0,226	0,241	0,055	0,061	0,175	0,180
	Bremung NV	[kWh/km]	0,313	0,397	0,390	0,529	0,208	0,257	0,284	0,366

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 Hilfsbetriebsbremung.
- Die weniger dichte Fahrzeugfolge des Szenarios 2 bewirkt eine verminderte Möglichkeit zur Netzbremung, 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 Wirkungsfaktoren zwischen den beiden Fahrplanszenarien und für Sommer/Winterbetrieb die spezifische Bruttoenergieaufnahme, die spezifische Netzbremung 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
Netzbremung	[kWh/km]	0,245
Energieaufnahme (effektiv)	[kWh/km]	2,505

Tabelle 5: Energiebedarf Fahrzeug

1.3.4 Energiebezug (mit Energiezwischen-speicherung 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	2,942
	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	3,061
	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

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 Netzbremung.

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
Jahres- mittel	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

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) erfolgte die Abschätzung des monetären Einsparpotentials nach Tabelle 8.



Nordend 861

GRAF & STIFT 038

KIEPELECTRIC

MAN



BAR-Z 297



			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
	861 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		
	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

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 BBG Eberswalde 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.

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

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 %.

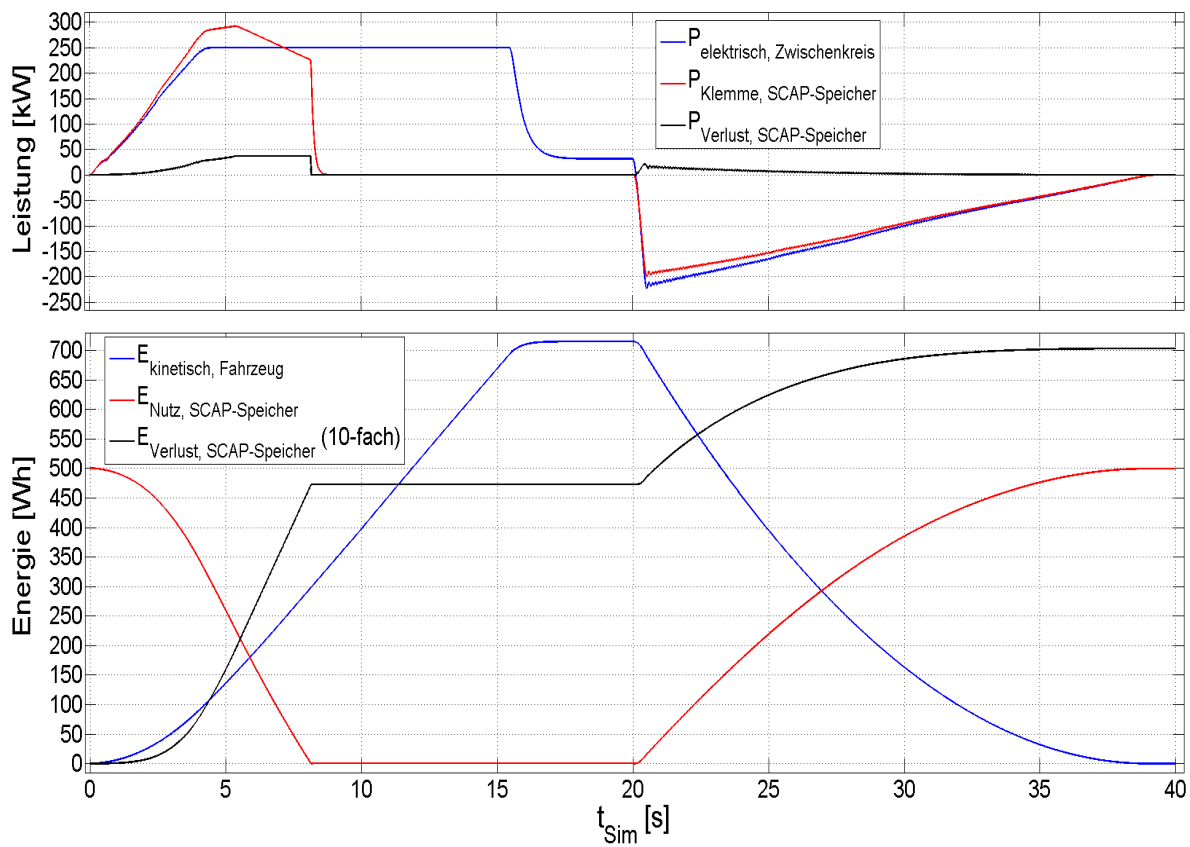


Abbildung 3: Speicherzyklus an der Klemme des ES am UW WEST für das Szenario 2 im Sommerbetrieb

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.

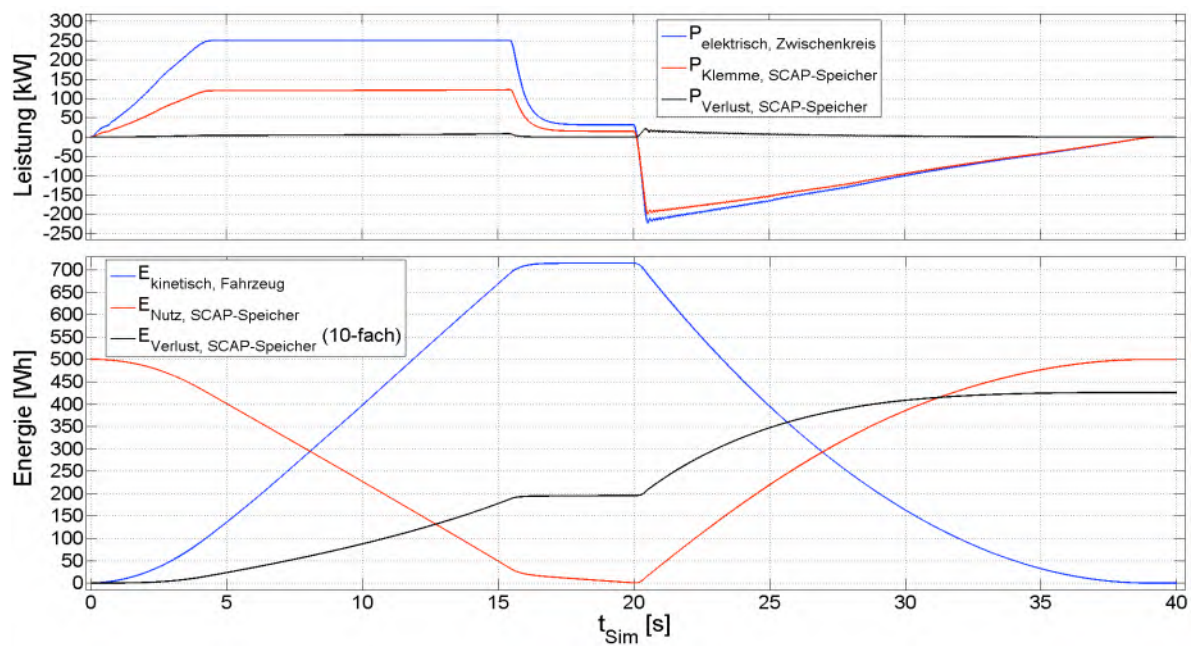


Abbildung 4: Speicherzyklus an der Klemme des ES am UW WEST für das Szenario 2 im Sommerbetrieb

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- hybrisbus

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 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 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 zusammen-geschaltet 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 mit den Herstellern Solaris und Cegelec nunbei der Bestellung des zwölften und letzten Fahrzeugs, 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.

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 Oberlei-

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

tungshybridbus 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. 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.

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.

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.

Dabei soll 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.

Dieser Oberleitungshybridbus wurde im Rahmen des EU-Projektes *"Trolley - Promoting electric public transport"* gefördert. Erfahren Sie mehr unter www.trolley-project.eu



Abbildung 1: Das Design des Oberleitungshybridbuses





TEIL C:
Marketing-Aktivitäten im
Rahmen von "Trolley - Promo-
ting electric public transport"

eBus-Kampagne: Vom O-Bus zum eBus - Mit elektrischer Mobilität clever in die Zukunft

Staus, hohe Abgasbelastung und Dauerlärm! Politiker und Bewohner der städtischen Agglomerationen, Umweltaktivisten und Verkehrsexperten suchen weltweit auch weiterhin nach Strategien, um den heutigen Verkehrsproblemen und Umweltrisiken zu trotzen.

Das Klima- und Energiepaket der EU weist den Transportsektor als einen Schlüsselfaktor zur erheblichen Verringerung der CO₂-Emissionen auf. Da Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor die größte Emissionsquelle in städtischen Gebieten darstellen, muss die e-Mobilität im öffentlichen Nahverkehr unbedingt gefördert werden, weil sie das Potential dazu hat, nachhaltige Auswirkungen auf die Umsetzung der bis 2020 zu erfüllenden Ziele des EU Klima- und Energiepakets zu haben.

Zur Erfüllung der langfristigen Zielvorgaben des EU Klima- und Energiepakets, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 60 % zu verringern, wird es auch unerlässlich sein, das Betriebssystem im Transportsektor zu ändern. Da der Straßengüterverkehr sich aus wirtschaftlichen Gründen erst über lange Entfernungen rechnet, ist der Umstieg vom Dieselmotor zum elektrisch angetriebenen Verkehrsmittel für die absehbare Zukunft nicht zu erwarten.

In der Zukunft wird es zwar Bemühungen geben, das Verhältnis zwischen Verbrennungsmotorbetriebenen und elektrisch angetriebenen Personenwagen im Individualverkehr erheblich zugunsten der Elektrofahrzeuge zu ändern, doch diese wünschenswerte Veränderung wird einige Zeit in Anspruch nehmen. Der hohe Kaufpreis der Personenwagen (insbesondere aufgrund der kostspieligen Akkus), die geringen Reichweiten, das hohe Gewicht und die landesweit notwendige Infrastruktur zum Laden der Akkus sind nur einige der Hindernisse, die es zu überwinden gilt. Folglich ist der sinnvollste Ansatz der öffentliche Nahverkehr in den Städten.

Eine wachsende Zahl von Städten setzt bereits auf eine nachhaltige und (fast) emissionsfreie Technologie: Oberleitungsbusse (*kurz: O-Bus*).

Der O-Bus hat sich in der Zwischenzeit zu einem Musterschüler in Sachen E-Mobilität entwickelt und ist das primäre Verkehrsmittel zur Ergänzung des e-Mobilität-Verkehrssystems in Städten und Ballungsräumen. Dank modernster Technologie präsentiert sich dieses System als ideale Alternative zum konventionellen dieselbetriebenen Verkehr und besticht durch viele Vorteile.

Gewicht und Effizienz des O-Bussystems wurden fortlaufend verbessert. Deshalb sind die Oberleitungen heutzutage viel weniger sperrig und wesentlich flexibler als frühere Systeme. Aufgrund der sichtbaren Linienführung der Oberleitungen (und damit der ständigen visuellen Präsenz im öffentlichen Raum) sind O-Busse sicherer; sie sind nachweislich weniger häufig in Verkehrsunfälle verwickelt als andere öffentliche Verkehrsmittel.

O-Busse können mehrere Elektromotoren haben und mit zusätzlichen Hilfsaggregaten ausgerüstet sein, beispielsweise mit Akkus, Supercaps (hochkapazitiven Kondensatoren), kleineren Dieselmotoren oder sogar mit einem Schwungrad. Dadurch bleiben sie fahrtüchtig, selbst wenn sie nicht mehr mit der Oberleitung verbunden sind. Das heißt, sie sind wesentlich flexibler als schienegebundene Fahrzeuge.

Gemeinsam mit der Straßenbahn haben sie eine Reihe von Vorteilen, wie zum Beispiel den elektrischen Antrieb (Elektrotraktion), die Energieeffizienz und den emissionsfreien Betrieb. Sie können bei wesentlich niedrigeren Baukosten (bis zu 80 %) eine ähnliche Beförderungskapazität erreichen. Weitere Vorteile gegenüber schienengebundenen Nahverkehrssystemen sind die schnellere Realisierungszeit und die weniger komplexe Bauausführung. Es ist aber auch möglich, Straßenbahnnetze mit O-Bussen zu kombinieren, wodurch Synergien geschaffen werden (durch die Verwendung bereits vorhandener Stromversorgungseinrichtungen) und eine flexible, kurzfristige Reaktion auf regionale Anforderungen erfolgt.

Auch auf Bergstrecken erreichen sie größere Höchstgeschwindigkeiten als Dieselflusse. Dies wirkt sich positiv auf die Umlaufplanung aus, mit weniger Fahrzeugen können kürzere Fahrzeiten zwischen zwei Haltestellen und somit auch kürzere Reisezeiten erzielt werden. Außerdem sind O-Bus-Motoren im Laufe der Jahrzehnte deutlich zuverlässiger geworden und die Lebensdauer eines O-Busses liegt deutlich über denen von Dieselflussen.

Insbesondere auf Linien mit langen Gefällestrecken oder einer Vielzahl von Bremsvorgängen können moderne O-Busse außerdem ihre Bremsenergie – analog zu elektrisch betriebenen Bahnen – in die Oberleitung zurückspeisen, wodurch eine Energieeinsparung von etwa 25 % erzielt wird.

Um ihre Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit noch weiter zu erhöhen, können O-Busse mit Hilfsagregaten ausgerüstet sein, wie zum Beispiel Akkus, kleineren Dieselmotoren oder sogar einem Schwungrad. Diese bessere Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit, in Verbindung mit dem niedrigeren Energiebedarf als auch der höheren Leistungsfähigkeit moderner O-Busse, führen zu kleineren Fahrzeugflotten als Dieselflotten und senken die Kosten für den Energieverbrauch beträchtlich.

In manchen O-Bussen werden darüber hinaus noch Hochleistungskondensatoren, sogenannte Supercaps als On-Bord-Energiespeicher eingesetzt. Sie sind in der Lage, die beim Bremsvorgang entstehende kinetische Energie effektiv zu speichern. Anschließend kann diese Energie wieder sogar wieder zum Beschleunigen, für die Heizung, Klimatisierung oder auch für oberleitungsfreie

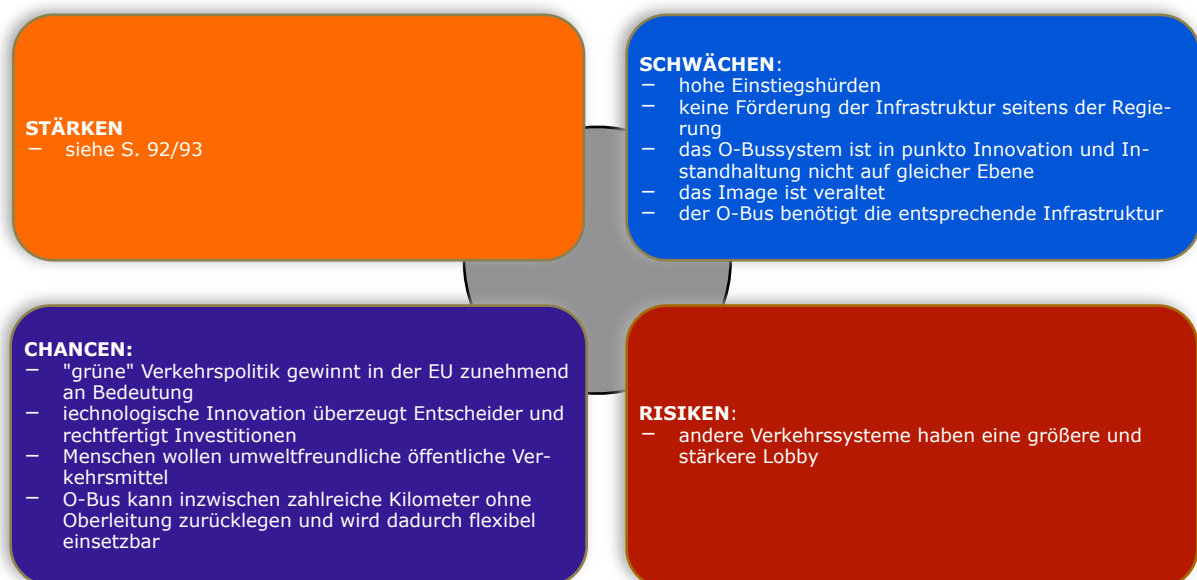


Abbildung 1: Stärken, Schwächen, Chancen, Risiken des O-Bussystems

Fahrten freigesetzt werden. Supercaps können nahezu in unbegrenzte Anzahl geladen und entladen werden. Ihr niedriges Gewicht ist ein großer Pluspunkt gegenüber Akkus.

Diese Technologie hilft den Energieverbrauch einzusparen, sowohl beim Betrieb an der Oberleitung als auch beim Supercap-Betrieb. Aber auch außerhalb des Oberleitungsnetzes können die Busse praktisch emissionsfrei fahren. Die Möglichkeit, eine Strecke unter Verwendung der an Bord gespeicherten elektrischen Energie oberleitungsfrei zu fahren, erhöht die Akzeptanz der Fahrzeuge bei Fahrgästen, Anwohnern und – vielleicht am wichtigsten – bei den Politikern.

Vorteile auf einem Blick

- O-Busse stehen für **lokal emissionsfreie Mobilität** und fahren **sehr geräuscharm** und **annähernd vibrationsfrei**.
- O-Busse **reduzieren den Lärmpegel** der Stadt, da sie durch den Elektroantrieb leiser sind (max. Schallpegel beim Dieselbus 85dBa, beim O-Bus 75dBa)
- Aufgrund der sichtbaren Linienführung der Oberleitungen (und damit der ständigen visuellen Präsenz im öffentlichen Raum) sind O-Busse sicherer; sie sind nachweislich **weniger häufig in Verkehrsunfälle verwickelt** als andere öffentliche Verkehrsmittel.
- O-Busse sind nicht nur leichter als Dieselbusse, sondern auch **zuverlässiger**, da die meisten von ihnen mit Akkus, Supercaps oder kleineren Dieselmotoren ausgestattet sind.
- Verglichen mit der Straßenbahn erreichen Trolleybusse **ähnliche Beförderungskapazitäten zu wesentlich niedrigeren Baukosten** (bis zu 80%, Quelle: <http://www.trolleyemotion.com/de/>, 2011).
- Gewicht und Effizienz des O-Bussystems wurden fortlaufend verbessert. Deshalb sind die Oberleitungen heutzutage viel weniger sperrig und wesentlich **flexibler als frühere Systeme**.
- Bei O-Bussen entsteht **im Stillstand** an der Haltestelle **kein Energieverlust**, und sie sind sogar in der Lage, die Bremsenergie in Stromspeicher zu leiten oder diese ins Fahrleitungsnetz zu rekuperieren und so **bis zu 25 % ihres Energieverbrauches einzusparen**.
- O-Busse haben den **niedrigstmöglichen Verbrauch** von nicht erneuerbaren Ressourcen und sie sind **100% umweltfreundlich**, wenn Energie aus erneuerbaren Quellen verwendet wird. Die zum Antrieb von O-Bussen benötigte Elektrizität kann im Grunde aus einer beliebigen Energiequelle stammen.
- Durch den verstärkten Einsatz von O-Bussen im europäischen öffentlichen Verkehr könnten die **CO₂-Werte drastisch reduziert** werden. Sie spielen eine Schlüsselrolle in der Erreichung der vorgeschriebenen Klimaziele im Jahr 2020.
- O-Busse besitzen durch seine **große Akzeptanz unter den Fahrgästen** großes Potential den Individualverkehr zu minimieren und so Verkehrsprobleme an Stadteinfahrten und neuralgischen Punkten zu verbessern.

- O-Bussysteme könnten **relativ rasch und kostengünstig implementiert** werden: es müssen keine Schienen verlegt werden. Die Errichtung der Oberleitungen benötigt verhältnismäßig wenige Ressourcen im Vergleich zu schienengebundenen Systemen.
- **Eine weltweit bewährte Technologie:** Es sind über 40.000 Fahrzeuge in etwa 320 Städten in 47 Ländern in Betrieb

Die internationale ebus-Kampagne: Vom O-Bus zum eBus

Trotz seiner Vorteile ist dieses Verkehrssystem in der Politik nicht anerkannt und sieht sich vielen Vorurteilen ausgesetzt. Vor allem sein verstaubtes Image, das auf seine lange Geschichte zurückzuführen ist, steht dem System im Weg.

Das Konsortium sah sich auf lokaler Ebene den gleichen Problemen gegenüber und stellte fest, dass vor allem am Image aktiv gearbeitet werden muss. Zu unscheinbar und still rollten die O-Busse in Europa in den vergangenen Jahrzehnten durch die Städte und wurden als System der Zukunft von Entscheidungsträgern schlichtweg vergessen.

An diesem Punkt wollte das Projekt im Rahmen seiner Marketing-Aktivitäten ansetzen und entwickelte eine Kampagne, die in der Projektlaufzeit international gestreut wurde. Um das Image nicht nur mit bildlicher Sprache aufzupolieren, setzt die Gruppe auf eine neue Wortmarke "eBus", die im Fokus der Kampagne steht.



Abbildung 2: Die Sujets der Trolley-Kampagne zur Förderung des O-Bussystems auf internationaler Ebene

Mit der "ebus"-Kampagne fördert das TROLLEY-Konsortium diese Form der elektrisch angetriebenen öffentlichen Verkehrsmittel als die sauberste und am meisten sozioökonomische Mobilitätslösung für den städtischen Nahverkehr der Gegenwart. Auf diesen Namen hat man sich geeinigt, um darzustellen, dass es sich beim O-Bus um eine sehr effiziente Form der Elektromobilität handelt.

Gemeinsamen, und doch individuell angepasst, macht die Kampagne des TROLLEY-Konsortiums

auf das enorme Potenzial dieses sauberen und volkswirtschaftlich effizienten öffentlichen städtischen Verkehrsmittels aufmerksam.

Das Konsortium stellt diese Kampagne gern kostenlos für Werbezwecke zur Verfügung. Bitte informieren Sie sich auf www.trolley-project.eu

Beispiele der ebus-Kampagne



Abbildung 5: Die adaptierte Kampagne für Parma, ITA

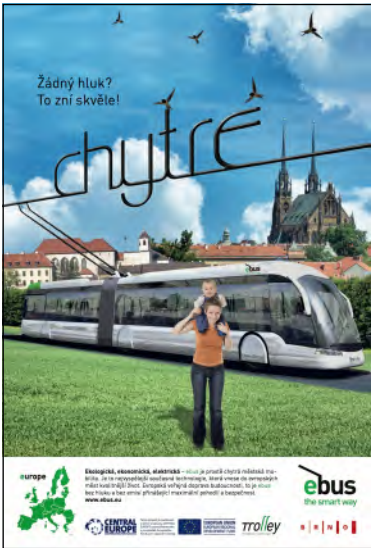


Abbildung 4: Die adaptierte Kampagne für Brno, CZ



Abbildung 6: Die adaptierte Kampagne für Eberswalde

Erfolgreiche Marketing-Aktivitäten in Eberswalde begleitet durch *"Trolley - Promoting electric public transport"* (2010-2012)

Im Zeitraum von 2010 bis 2012 modernisierte die Barnimer Busgesellschaft ihre O-Busflotte und schlug damit ein neues Kapitel auf. Dass die Aussonderung der alten Fahrzeuge bei den Fahrgästen nicht problemlos verlaufen würde, war dem Unternehmen bewusst. Rollten die alten O-Busse von ÖAF Gräf & Stift NGE 152 M17 schließlich über 18 Jahre durch Eberswalde und symbolisierten Beständigkeit.

Der gesamte Modernisierungsprozess wurde daher behutsam von der Aussonderung der "alten" O-Busse bis hin zur Begrüßung der Neufahrzeuge des polnischen Herstellers Solaris begleitet. Oberste Zielstellung war zahlreichen Marketing-Aktivitäten war

- die Stärkung der Akzeptanz des O-Bussystems in der Region,
- die Modernisierung des Images der O-Busse als Verkehrssystem von Morgen,
- die Einführung der neuen O-Busse mit seinen nachhaltigen Technologien.

Stets sollten die Fahrgäste, Bürger der Stadt und politische Vertreter in den Prozess eingebunden werden und transparent informiert werden.



Abbildung 7: Ein O-Bus aus Salzburg zu Besuch in Eberswalde

Sehr gelegen im Zeitraum der Neuanschaffungen und im Rahmen der gesetzten Ziele kam der Barnimer Busgesellschaft das Jubiläum **"70 Jahre O-Bus in Eberswalde"** (2010), denn das Jahr 2010 stand somit ganz im Zeichen der O-Busse.

Bereits Anfang des Jahres, im Januar 2010, verzeichnete Eberswalde sein erstes Highlight und hieß einen internationalen Gast willkommen. Ein O-Bus aus dem österreichischen Salzburg, stattete Eberswalde im Rahmen einer Testphase einen Besuch ab. Das Fahrzeug des polnischen Herstellers entsprach dem Typ der 12 neu bestellten Solaris Fahrzeuge für Eberswalde. Öffentlich wurde diese Testphase von den Medien begleitet und hielt Fahrgäste an, ihre Meinung zu äußern. Die Meinung der Fahrgäste in punkto Innenraumbestuhlung, Sitzplätze, Haltestangen oder zu den Ein- und Ausstiegsbereichen flossen später sogar in den Beschaffungsprozess ein.

Im August wartete das große Highlight: "70 Jahre O-Bus in Eberswalde". Bei einer groß angelegten Veranstaltung am 21. August 2010 im Stadtzentrum von Eberswalde wurde der gesamte Marktplatz in ein offenes Museum verwandelt. Vier O-Busse auf dem Marktplatz luden die Bürger der Stadt zum Verweilen ein und informierten zu unterschiedlichen Themen. Für Technikinteressierte, Geschichtsinteressierte, ÖPNV-Liebhaber, Familien mit Kindern war gleichermaßen etwas dabei.

Da beim O-Bus natürlich die Oberleitung nicht fehlen darf, wurde diese künstlich nachgestellt und präsentierte die Geschichte der vergangenen Jahrzehnte schwebend von der Gleislosen Bahn über die Straßenbahn bis hin zum ersten O-Bus in Eberswalde im Jahr 1940.

Im Rahmen der Aktion **"Der O-Bus zieht an"** wurde mit T-Shirts regional ansässiger Firmen und Vereine sogar ein O-Bus, im wahrsten Sinne des Wortes, angezogen. Die Firmen und Vereine zeigten damit ihre Verbundenheit zum O-Bus in Eberswalde. Verbundenheit konnten auch die Besucher der Veranstaltung zeigen und sich in einer persönlichen **Grußbotschaft auf einem O-Bus** verewigen.

Natürlich fehlte auch das mittlerweile fest integrierte **O-Busmaskottchen "Strippi"** nicht. Das Maskottchen wurde eigens zu diesem Jubiläum kreiert und erblickte im November 2009 das Licht der Welt. Der Name für den O-Bus-Repräsentanten wurde öffentlich gesucht und mit großer Mehrheit gewählt. Der kleine Sympathieträger ist inzwischen fester Bestandteil des Eberswalder Stadtverkehrs und verziert die O-Busse an der Front sowie die Haltestel-



Abbildung 8: In der Vorbereitungsphase der T-Shirt-Aktion "Der O-Bus zieht an"



Abbildung 9: O-Bus Nr. 011 auf seiner letzten Runde vor der Aussonderung. Die Bürger Eberswaldes verzierten den Bus mit ihren Botschaften bei Jubiläum "70 Jahre O-Bus"



Abbildung 10: Präsentation des Oberleitungshybridbusses am 30.06.2012 auf dem Eberswalder Marktplatz

len, die durch den O-Bus angefahren werden. Damit wird es selbst für Besucher der Stadt kinderleicht, den Stadtverkehr zu nutzen.

Aber auch technische Neuerungen kamen an diesem Tag wieder nicht zu kurz. Die Firma RWS Railway Service GmbH entwickelte einen Energiespeicher, bestehend aus einer Li-Keramik-Batterie und UltraCaps, der in einem O-Bus ÖAF Gräf & Stift NGE 152 M17 verbaut wurde. Das geförderte Projekt wurde ausgiebig für Technikinteressierte vorgestellt.

Sonderausstellung im Museum

Neben allen technischen Neuerungen und der grundsätzlichen Zielstellung das Image bei den durchgeführten Veranstaltungen zu erneuern, wurde aber auch der Ursprung nie vergessen.

In einer **Sonderausstellung "Vom O-Bus zum eBus - Mit elektrischer Mobilität clever in die Zukunft"** im Stadtmuseum ging es zurück zu den Anfängen. Von März bis August 2011 präsentierte die Sonderausstellung, begleitet durch die Stadt Eberswalde selbst und dem EU-Projekt Trolley, die Anfänge bis zur Gegenwart.

Um der Ausstellung eine moderne Note zu geben, setzen die Macher bewusst auf einen bunten Mix an geschichtliche Anekdoten, gaben zusätzlich einen Einblick in gegenwärtige Aktivitäten rund um den O-Bus und einen Ausblick in zukünftige Entwicklungen und Technologien. Geschichtsinteressierte wie auch Technikinteressierte kamen bei dem Besuch der Sonderausstellung gleichermaßen auf ihre Kosten und erlebten Geschichte zum Anfassen.

Da die Ausstellung auf reges Interesse stieß, wurde sie sogar bis August 2011 verlängert. Ursprünglich war das Ende der Ausstellung am 29. Mai 2011 geplant.



Abbildung 11: Das Werbeplakat für die Ausstellung "Vom O-Bus zum eBus - Mit elektrischer Mobilität clever in die Zukunft" zeigt eine Fotomontage zweier O-Busse. Damit sollte die Verbindung der Geschichte und der Gegenwart symbolisiert werden.

Zielstellung erfüllt - Image dank Trolley modernisiert

Emissionsfrei. Innovativ. Nachhaltig. - Auch dank des EU-Projektes "*Trolley - Promoting electric public transport*" konnte das Image der O-Busse in Eberswalde rückblickend in den vergangenen Jahren abgestaubt werden.

Durch die konstante und transparente Kommunikation rund um die neuen Technologien und ihre Vorteile, konnte das O-Bussystem als nachhaltiges, modernes und innovatives Verkehrssystem präsentiert werden. Die zahlreichen Veranstaltungen trugen dazu bei, den O-Bus in der Bevölkerung auch weiterhin als Verkehrssystem in Eberswalde zu verankern.



70 Jahre O-Bus in Eberswalde





TROLLEY - DAS PROMOTION VIDEO

Zur effektiveren Vermarktung und zur besseren Herausstellung der Vorteile des O-Bussystem, erstellte die gesamte Projektgruppe ein 10-minütiges Video. Das Trolley-Video ist dabei ein fester Bestandteil der Bewerbung des EU-Projektes und wirbt für das O-Bussystems als intelligente Lösung für den Nahverkehr in ganz Europa.

Beauftragt wurde für die Umsetzung die Eberswalder Produktionsfirma Amigo Media, die mit ihren kreativen Köpfen über eine langjährige Erfahrung verfügt.

Der Film selbst basiert auf Interviews mit den lokalen und regionalen Akteuren in den Partnerstädten Salzburg (Österreich), Brno (Tschechien), Eberswalde (Deutschland), Parma (Italien), Gdynia (Polen) und Szeged (Ungarn).

Kurz und prägnant erläutert jeder Akteur die Vorzüge des O-Busses und berichtet über die Bedeutung dieses Verkehrsmittel in der eigenen Heimat. Auch Vorurteile werden thematisiert und auf lokale, nationale und internationale Hürden eingegangen.

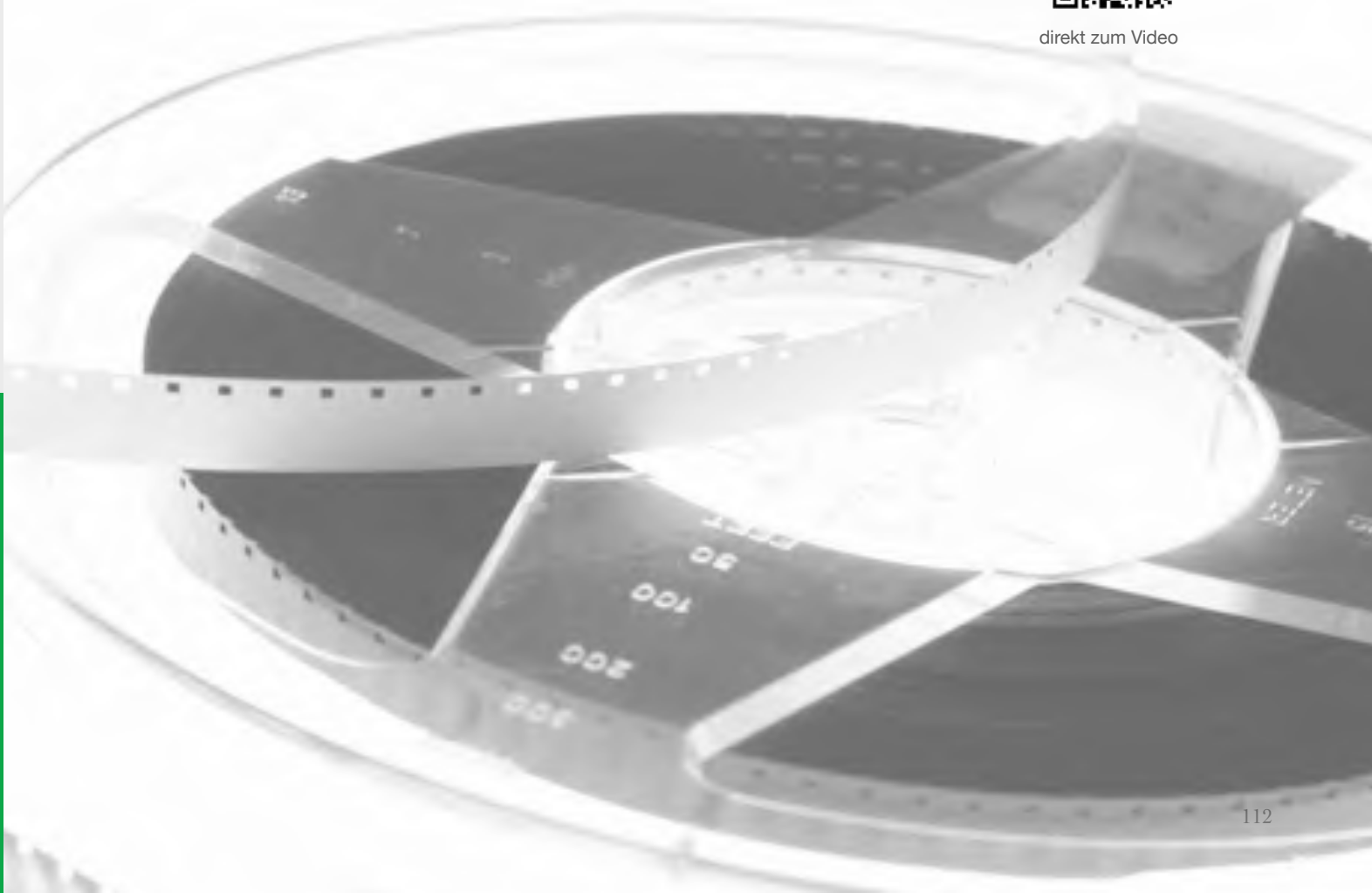
Um das Video authentisch zu halten und auch die Schwierigkeit auf internationaler Ebene zu verdeutlichen, wurden die Interviews in der Muttersprache belassen und nur mit Untertiteln übersetzt.

Dies signalisiert deutlich, dass unabhängig der Landesgrenzen, dieses innovative System international mit den gleichen Vorurteilen zu kämpfen hat. Aber auch, dass in den verschiedenen Ländern der O-Bus genügend Potential hat, um ein langfristiges Umdenken zu forcieren.

Sie finden das Trolley-Video im Internet auf unserer Webseite unter **www.bbg-eberswalde.de**, auf **Youtube**, **Facebook** oder **Vimeo**.



direkt zum Video







Er rollt auch ohne!
Ohne Auspuff.

**ZERO
EMISSION
VEHICLE**

Unterwegs mit
Lithium-Ionen-Batterie.

Cegelec

SOLARIS

BAR BG 963

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
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 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 erarbeitet durch:

FRAUNHOFER-INSTITUT

für Verkehrs- und Infrastruktursysteme
Zeunerstraße 38
D - 01069 Dresden

Fotos:

Museum in der Adler-Apotheke Eberswalde, Adpic, Veit Springer, Joachim Lerch

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.

