

Energiespeicher für Straßen- und Stadtbahnen

Dr. Ing. Hugo Hohmann, Dr. Ing. Michael Steiner

Bombardier Transportation
Fabrikstraße 41, D-02625 Bautzen

Bombardier Transportation
Neustadter Straße 62, D-68309 Mannheim

Kurzfassung

Bombardier Transportation ist bestrebt, seine Produkte kontinuierlich fortzuentwickeln, um die Umweltverträglichkeit und die Wirtschaftlichkeit des Betriebs zu verbessern. Dies ist Ausdruck unseres Bekenntnisses zu nachhaltiger Entwicklung in Bezug auf den globalen Ressourcenverbrauch und unserer Konzentration auf die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit des schienengebundenen Verkehrs, für den Bombardier Produkte und Dienstleistungen entwickelt und vertreibt. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über aktuelle Marktbedürfnisse zum Thema Energiemanagement im System Straßen- und Stadtbahnen. Ausgehend von den Marktanforderungen werden alternative Lösungswege zur Energieeinsparung erörtert. Die Bombardier *MITRAC* Energy Saver Lösung wird dargestellt, die entsprechende neue betriebliche Forderungen ermöglicht, die Energieeffizienz des Systems verbessert und die direkt zu Einsparungen in den Errichtungskosten des Verkehrssystems bzw. in den Betriebskosten führt. Die grundlegenden systemtechnischen Entscheidungen werden plausibel erläutert und es wird über die praktische Erfahrungen aus einem Feldversuch berichtet, mit Hilfe dessen die Alltagstauglichkeit der Technologie und die Wirksamkeit des Konzepts bezüglich der Funktionalitäten nachgewiesen wurden.

Schlagworte:

Straßen- und Stadtbahnen, Energiespeicher, Energieeffizienz, Energiemanagement, hybride Antriebstechnik, oberleitungsfreier Betrieb

1. Einleitung

Schienenfahrzeuge sind bereits heute wegen des ca. fünffach geringeren Rollwiderstands gegenüber dem Automobil die energieeffizientesten Betriebsmittel des Personen- und Güterverkehrs. Elektrische Schienenfahrzeuge schneiden bei vergleichender Betrachtung besonders günstig ab, weil sie sich die hohen Wirkungsgrade der elektrischen Energieumwandlung zu Nutze machen. Würden diese Fahrzeuge mit regenerativ erzeugtem Strom betrieben, wäre die Umweltbilanz bezüglich Emissionen ideal. Trotzdem gibt es noch Potentiale, die sich seit der Erforschung von elektrischen Hochleistungsspeichern erschließen lassen wie zum Beispiel der Umgang mit der beim Bremsen frei werdenden Bremsenergie. Heutzutage ist bei modernen Straßen- und Stadtbahnen die elektrodynamische Bremse die eigentliche Betriebsbremse bis fast zum Stillstand. Eine mechanische Bremse wirkt nur im Ausnahmefall bzw. wird als Feststellbremse eingesetzt. Die beim Bremsen frei werdende Energie kann in die Oberleitung zurückgespeist werden, wenn diese ohne unzulässige Spannungsüberhöhungen aufnahmefähig für Rückströme ist, oder muss über einen Bremswiderstand vernichtet werden. Dieses unterbleibt, wenn mit der frei werdenden Bremsenergie ein Speicher aufgeladen werden kann.

Hat man erst mal einen Energiespeicher an Bord, so kann man diese gespeicherte Energie für betriebliche Zwecke wieder nutzen, ohne neue Energie aus der Oberleitung ziehen zu müssen. Hier deckt sich die Funktionalität eines Energiespeichers an Bord mit einer anderen Marktforderung, nämlich den Betrieb eines Schienenfahrzeugs auch bei nicht funktionsfähiger bzw. nicht vorhandener Oberleitung zu verlangen. Diese Forderung wird als oberleitungsfreier Betrieb (CFO - catenary free operation) bezeichnet und wird insbesondere beim Bau neuer Straßen- und Stadtbahnssysteme gefordert für Bereiche des Schienennetzes, in denen die Oberleitung als „störend oder unästhetisch“ empfunden wird. Im Extremfall (kompletter Verzicht auf die Oberleitung) führt diese Forderung entweder zu vollkommen autonomen Schienenfahrzeugen (alle Fahrenergie im Speicher an Bord) oder zu alternativen Systemen der Energieverteilung, die man entweder überhaupt nicht „sieht“ oder die als „ästhetisch“ empfunden werden. Die möglichen Lösungen werden im Folgenden erörtert.

2. Alternative Energiespeichertechnologien

Wie kann man nun Energie an Bord eines Schienenfahrzeugs speichern? Bevorzugt wäre die elektrische Speicherung, da moderne Straßen- und Stadtbahnen heutzutage aus Umwelt- und Energieeffizienzgründen elektrisch betrieben werden und weil jede Energieumwandlung in einen anderen Energieträger wieder mindestens mit Wirkungsgradverlusten behaftet ist.

Nun, der Plausibilität halber sollen die praktikablen physikalischen Möglichkeiten der Energiespeicherung aufgelistet werden. Ein Anspruch auf Vollständigkeit besteht nicht:

Mechanisch

Schwungrad, Federspeicher, Luftspeicher

Elektrisch

Batterie, Hochleistungskondensator

Chemisch

Brennstoffe im Tank (Kohlenwasserstoffe, Wasserstoff,.....)

2.1. Erörterung der Lösungen

Beginnen möchten wir mit einem Analogon bezüglich des anzustrebenden Energieinhalts solcher Energiespeicher an Bord von Straßen- und Stadtbahnen. Nimmt man an, dass man mit einem gefüllten Energiespeicher im oberleitungsfreien Betrieb mit einem 30 m Fahrzeug einen Haltestellenabstand von ca. 500m bei ebener Strecke fahren möchte, ergeben Auslegungsrechnungen einen Energiebedarf für zuverlässigen Betrieb von ca. 3,0 kWh Nutzenergie. Über die Gleichung $1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm}$ kann man leicht ausrechnen, dass dies, in potentieller Energie ausgedrückt, einem Gewicht von ca. 12,1 Tonnen auf der Spitze der Frauenkirche (Höhe: 91 m) entspricht!

2.1.1. Mechanische Lösungen

Die Optionen, einen mechanischen Federspeicher oder einen Druckluftspeicher zu bauen der den oben genannten Energieinhalt fassen kann, sind schnell beiseite gelegt.

Es bleibt das Schwungrad als Energiespeicher, eigentlich eine altbekannte Technologie. Mittlerweile sind Schwungräder verfügbar mit Energieinhalten, die sogar über den oben genannten Bedarfswerten liegen. Auch sind diese Aggregate kompakt zu bauen, weil man die Energiedichte durch hohe Drehzahlen erreicht.

Zwei Gründe sprechen gegen den Einsatz des Schwungrads in der heutigen Technologie:

- Energieeffizienz - der Umwandlungsprozess von elektrischer Energie in mechanische Energie ist verlustbehaftet und beschränkt die notwendigerweise zu übertragende Impulsleistung im Brems bzw. Beschleunigungsvorgang
- Sicherheitsbedenken - beim Gehäusebruch des Schwungrads würde der Rotor frei, dessen kinetische Energie (zur Erinnerung: 12,1 to von der Frauenkirche!) sich irgendwie abbauen muss.

Ein Unfall dieser Art bei einem Versuchsfahrzeug ist in Fachkreisen bekannt. Mögliche Ansätze, um die Aggregate sicherer zu machen, sind die Verstärkung der Gehäuse des Schwungrads oder die Umstellung auf Gaskühlung für die innere Kühlung der Aggregate, um überkritische Erhitzungen von Flüssigkeiten zu vermeiden.

Wegen systemtechnischer Betrachtungen dieser Art ist das Schwungrad zurzeit nicht die Vorzugslösung für Straßen- und Stadtbahnen bei Bombardier.

2.1.2. Elektrische Lösungen

Magnetische Energiespeicherkonzepte wurden wegen des zu erwartenden hohen Gewichts und des Infrastrukturaufwandes nicht betrachtet.

Betrachtet wurden die Lösung mit Batterie und die Lösung mit Super Kondensatoren (UltraCaps)

Batterien

Batterien zeichnen sich durch ihre hohe Speicherkapazität aus. Allerdings sind sie nicht geeignet, hohe Ströme abzugeben, wie sie zum Beispiel beim Anfahren benötigt würden. Das Gleiche gilt auch für den Ladestrom, sodass die Aufnahme von Bremsenergie (Spitzenwerte) nur begrenzt möglich ist. Des Weiteren haben Batterien (z.B. NiMH) nur eine beschränkte Lebensdauer, die stark von den Lade/Entladezyklen und dem Lade/Entladehub abhängt. Benötigte Infrastruktur für die Batterie und relativ starker Einfluss des Einsatztemperaturbereichs (Klima) sind ebenfalls zu berücksichtigende Gesichtspunkte. Bei den Sicherheitsbetrachtungen im Fall von Batterien ist jeweils das Verhalten bei inneren Kurzschlüssen zu beurteilen. Konsequenzen müssen im Brandschutzkonzept der Fahrzeuge berücksichtigt werden.

Wegen dieser Systemüberlegungen und deren Bewertung sind Batterien zurzeit nicht die Vorzugslösung für Straßen- und Stadtbahnen bei Bombardier. Das Bild mag sich ändern, wenn Lithium Ionen Batterien (oder andere Batterietechnologien) in der erforderlichen Leistungsklasse als zuverlässige Komponenten zur Verfügung stehen.

Super Kondensatoren

Super Kondensatoren waren schon seit 1995 in den Vorläuferorganisationen von Bombardier Transportation (z.B. ABB Transportation) als Technologieprogramm unter Beobachtung beziehungsweise Gegenstand der Forschung. Mittlerweile haben sich stabile Lieferanten etabliert, die die Technologien in zuverlässige Produkte umgesetzt haben. Super Kondensatoren werden auch in anderen Industrien angewendet, sodass sich ein Industriestandard bezüglich der Typisierung bald herausstellt. Durch die Abnahmemengen wird auch der Preis degressives Verhalten zeigen. Da es sich im Vergleich zu Schwungrad und Brennstoffzelle um eine recht junge Technologie handelt sind noch Steigerungsraten bezüglich der performance zu erwarten.

Ein Energiespeicher, aufgebaut mit Super Kondensatoren ist von der Geometrie her einfach gestaltbar, da die Super Kondensatoren relative kleine Komponenten sind, die man je nach benötigtem Speicherbedarf kaskadieren und anordnen kann. Derartige Energiespeicher sind prinzipiell einfache, robuste passive Baugruppen, die geringe Ansprüche an die Einsatzumgebung stellen. Im Gegensatz zu den Batterien sind Super Kondensatoren in der Lage, hohe Ströme aufzunehmen oder abzugeben, und sind wesentlich zyklusfester. Sicherheitsbedenken im Fehlerfall bestehen nicht, da die einzelnen Zellen kurzschlussfest sind. Beim Brandschutzkonzept ist die Brandlast solcher Baugruppen zu beachten.

Aus den genannten Gründen hat sich Bombardier im Jahr 2003 entschlossen, Energiespeicher mit Super Kondensatoren aufzubauen und diese in einem Langzeittest auf einer Straßenbahn im Liniendienst praxisgerecht zu erproben.

2.1.3. Chemische Lösungen

Die Überschrift klingt etwas abstrakt. Wir kennen alle die üblichen chemischen Energiespeicher auf Fahrzeugen. Man füllt üblicherweise Benzin oder Dieselöl hinein. Nur lassen sich diese Tanks nicht wieder füllen durch Verwertung von Bremsenergie. Man kann höchstens den Verbrauch mindern, indem man parallel zum Tank einen der anderen bereits vorgestellten Energiespeicher zur Rückspeisung von Bremsenergie einsetzt. Damit kommt man zu so genannten hybriden Antriebskonzepten, die sich durchaus von den in der Automobilindustrie verfolgten technischen Konzepten unterscheiden. Dazu später mehr.

Zunächst sei auf die verfügbaren Brennstoffe eingegangen und deren systemtechnischen Beurteilungen für den Einsatz auf Straßen- und Stadtbahnen. Vorausgesetzt sei auch noch die Bemerkung, dass der Industriesektor Schienenfahrzeuge in sich zu klein ist, um eigene Grundlagenentwicklungen zum Thema alternative Energienutzung durchzuführen bzw. revolutionäre Systemlösungen zu generieren. Die Eisenbahnindustrie sollte im Grunde ein „Technologiefolger“ sein und bewährte Lösungen für den eisenbahnspezifischen Einsatz adaptieren. Ausnahmen bestätigen die Regel.

Benzin und Diesel

Die Technologie dieser Verbrennungskraftmaschinen ist ausgereift, speziell im Automobilsektor. Mit solchen Verbrennungsmotoren lassen sich heute Stromerzeuger auf Fahrzeugen betreiben, die dann in den elektrischen Antriebstrang von Schienenfahrzeugen einspeisen. Die Frage ist, ob der Markt weiteren dezentralen innerstädtischen CO₂ Ausstoß akzeptiert z. B. im Zusammenhang mit der Forderung nach oberleitungsfreiem Betrieb. Eine Kompromisslösung könnte sein, einen elektrischen Antriebstrang mit Energiesparfunktion aufzubauen und einen Motorgeneratorsatz kleiner Leistung nur mitzuführen, um im „Notfall“ autonom an Bord Energie zu erzeugen, wenn auf Grund einer Wegblockade im oberleitungsfreien Bereich der elektrische Energiespeicher wegen des Energieverbrauchs der Hilfsbetriebe zur Neige ginge. Die Überlegungen dazu sind noch nicht ausgereift, es ist noch weitere Grundlagenarbeit zu machen natürlich auch bezüglich der Technik der Fahrzeuge und der Integration der Gesamtanlage.

Flüssiggase

Alternativ können Verbrennungsmaschinen auch mit Flüssiggasen betrieben werden. Im Allgemeinen ist dies mit einer Reduktion an Energiedichte verbunden und mit einer Steigerung des Aufwands für die Speicherung dieser Brennstoffe an Bord. Wegen des geringeren Siedepunkts verglichen mit Benzin oder Dieselöl ist mit Verdampfungsverlusten bei Undichtigkeiten zu rechnen. Auch das Verteilnetz solcher Brennstoffe wird erst zu entwickeln sein, um wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen.. Ansonsten gelten ähnliche Systemüberlegungen wie für den Einsatz von konventionellen Verbrennungskraftmaschinen.

Wasserstoff

Wasserstoff nimmt eine Sonderrolle in der Diskussion ein. Einerseits kann Wasserstoff in einem Verbrennungsmotor zu mechanischer Energie umgesetzt werden, andererseits kann man mit Wasserstoff in einer Brennstoffzelle unmittelbar Strom erzeugen. Wie sind diese Technologien zurzeit zu beurteilen durch eine Branche, die als „Technologiefolger“ charakterisiert ist?

Ist Wasserstoff umweltfreundlich? Landläufig schaut man nur auf das Ende der Wirkungskette eines Wasserstoffkreislaufs und kommt zu der Auffassung, dass bei der Energieerzeugung mittels Wasserstoff nur Wasser entsteht. Das ist wohl zu simpel. Natürlich entsteht kein CO₂. In der Brennstoffzelle entsteht nur Wasser aber im Wasserstoff-Verbrennungsmotor entstehen in gewissem Maß auch andere Verbrennungsprodukte (NO_x) und es entsteht in beiden Fällen wegen des begrenzten Wirkungsgrads Abwärme, die ebenfalls zur globalen Erwärmung beiträgt. Hinzu kommen die Verluste durch die Flüchtigkeit des Wasserstoffs während der Lagerphase. Zusätzlich ist der Aufwand, um den Wasserstoff lagerfähig und transportfähig zu machen (Kühlung und Verdichtung) zu bilanzieren und der erhebliche Energieeinsatz während der Erzeugungsphase des Wasserstoffs mittels Reformer. Die Erzeugung über Photovoltaik und Elektrolyse ist zwar regenerativ, aber die Ausbeute ist gering. Fast alle Prozessphasen sind durch geringe Wirkungsgrade charakterisiert. Wenn man den Wasserstoff als Speichermedium für Strom sieht, wird die dazugehörige Systemtechnik der Wasserstoffkreislaufwirtschaft im Sinne der Umweltbilanz und im Sinne des zeitnahen Rückflusses der Investitionsmittel wegen der geringen Wirkungsgrade bezogen auf die eingesetzte Primärenergie nicht Ziel führend sein. Man wird wohl zurückfinden müssen zu Stromerzeugungsanlagen mit hohem Wirkungsgrad und hohen Energiedichten und einer verlustarmen und flexiblen Stromverteilung.

Zurück zur Systemtechnik auf Straßen- und Stadtbahnen. Wie auch bei den anderen Stromerzeugern an Bord von Schienenfahrzeugen macht es nur Sinn, die Wasserstoff nutzenden Aggregate zusammen mit Energiespeichern zu betreiben, um sie vom Fahrspiel der Fahrzeuge zu entkoppeln. Dies gilt insbesondere für die Brennstoffzelle, die für Wechsellast nicht geeignet ist. Weitere Hemmnisse ist die begrenzte Lebensdauer der heutigen Generation der Brennstoffzellen, das schwierig zu lösende Problem des Tanks, die systemtechnischen Untersuchungen zu Fragen der öffentlichen Sicherheit und Ordnung und nicht zuletzt die Kosten für solche Systeme. Diese Zusammenhänge sind weiter zu evaluieren, bis eine Situation eintritt, die ein beherztes Investment in diese Technologie rechtfertigt. Es wird auch abzuwarten sein, wie die Automobilindustrie bzw. die Energieerzeuger die Wasserstofftechnologie in der Breite voranbringen

3. MITRAC Energy Saver – Prototyp und erste Erfahrungen

Um die Wirksamkeit des Konzepts zu prüfen und die Alltagstauglichkeit nachzuweisen wurde ein Fahrzeug bei dem Kunden RNV in Mannheim mit dem Bombardier *MITRAC*

Energy Saver ausgerüstet (Bild 1). Seit September 2003 fährt dieses Fahrzeug im normalen Fahrgastbetrieb.



Bild 1: Prototypfahrzeug beim RNV in Mannheim

Das Fahrzeug hat zwei angetriebene Drehgestelle mit jeweils zwei Motoren. Die Drehgestelle haben jeweils eigene Stromrichter. Um einfache Vergleichsmessungen machen zu können, wurde nur das vorlaufende Drehgestell mit einem *MITRAC* Energy Saver ausgerüstet. Der *MITRAC* Energy Saver ist mit dem Spannungszwischenkreis des Antriebsstromrichters verbunden (Bild 2).

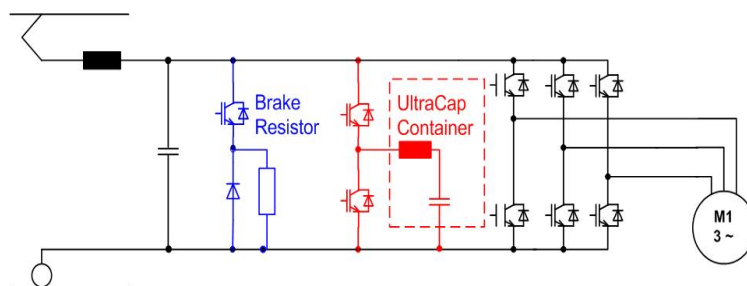


Bild 2: Prinzipschaltbild der Integration des *MITRAC* Energy savers

Der seit 2003 im Fahrgastbetrieb eingesetzte Energiespeicher nutzt die Technologie der Super Kondensatoren des Jahres 2001 und hat folgende Daten:

- Speicherkapazität: 1 kWh

- Abmessungen: 1900 x 950 x 455 mm
- Gewicht: 450 kg

Der Energiefluss zwischen Zwischenkreis und Energiespeicher wird mittels eines IGBT Stellers in beiden Richtungen bewerkstelligt als step-down Steller für den Ladevorgang des Speichers und als step-up Steller für den Entladevorgang.

Nachweis der Systemfunktionen

Durch vergleichende Messungen der Ströme der beiden Drehgestelle wurde die Funktionsfähigkeit des Systems in den erwarteten Zielstellungen bestätigt (Bild 3). Der Strombedarf des Drehgestells mit dem MITRAC Energy Saver ist etwa um die Hälfte kleiner als der Strombedarf des Drehgestells ohne den Energiespeicher.

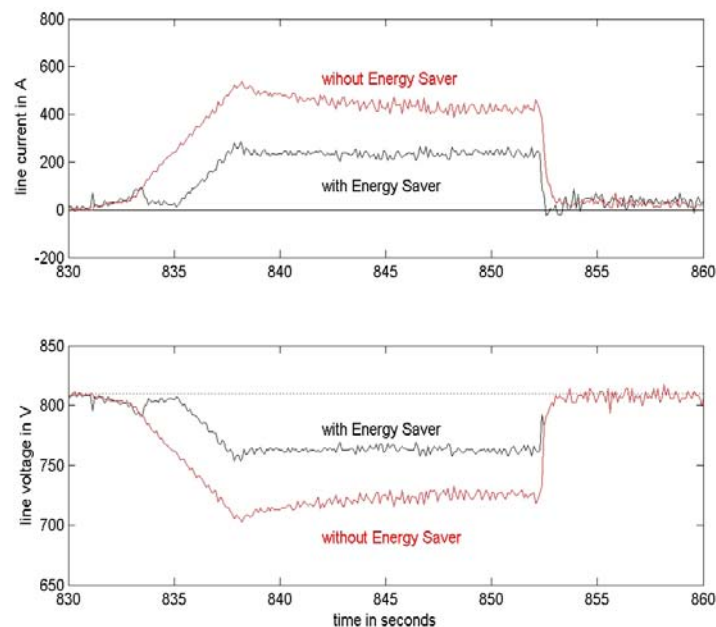


Bild 3: Oberleitungsstrom/spannung mit und ohne Energiespeicher

Alltagstauglichkeit

Der Betrieb des Prototypfahrzeugs über drei Jahre verlief störungsfrei. Außer den routinemäßigen Sichtprüfungen und der gelegentlichen Reinigung der Filtermatten des Kühlluftkreislaufs fallen keine weiteren Instandhaltungsarbeiten an. Das System kann als robust und geeignet für den Serieneinsatz bezeichnet werden.

Nutzen

Mit dem Prototypfahrzeug konnten 30 % Einsparung der Traktionsenergie nachgewiesen werden. Die Reduktion des Strombedarfs des Fahrzeugs führt auch zur Reduzierung der

ohmschen Leitungsverluste in der Oberleitung und der Infrastruktur (IR²). Da die Betreiber neben den Energieverbrauchskosten auch Bereitstellungsgebühren für Spitzenstrombedarf bezahlen, reduzieren sich die damit verbundenen Kosten entsprechend. Einhergehend mit der Reduktion des Spitzenstroms wird die Spannungsabsenkung des Netzes unter Last positiv beeinflusst. Das Netz wird durch den Einsatz der Energiespeicher stabilisiert. Dies kann auf mehrere Weise genutzt werden:

- Weniger Unterwerke bei einem Streckenneubau
- Oder höhere Zugfrequenz bei gleicher Einspeisesituation
- Oder Zulassung von Zügen mit höherer Leistung ohne Nachrüstung der Infrastruktur

Erst wenn man das Gesamtsystem betrachtet, zeigt sich die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Energiespeichern zur Steigerung der Energieeffizienz. Die Umweltauswirkungen sind unbestreitbar positiv, da diese Technologie zu weniger Energieverbrauch bei gleicher Leistung führt.

4. Oberleitungsfreier Betrieb

Die Forderung nach oberleitungsfreiem Betrieb von Straßen- und Stadtbahnen hat zwei Wurzeln.

Fall 1:

In Frankreich fand in den letzten Jahren eine Renaissance von Straßenbahnsystemen statt. Nach dem zweiten Weltkrieg wurden viele Systeme in Frankreich zu Gunsten der „autofreundlichen“ Stadt stillgelegt. Mittlerweile sieht man ein, dass leistungsfähige öffentliche Personennahverkehrssysteme wesentlich mehr zur lebensfreundlichen Stadtentwicklung beitragen als verstopfte Straßen. Während in anderen europäischen Städten Straßen- und Stadtbahnsysteme von je her mit Oberleitungen betrieben wurden und sich niemand daran störte, wurde beim Neubau von Systemen in Frankreich die Oberleitung zumindest in attraktiven, meist historischen Plätzen als unästhetisch empfunden.

Fall 2:

Ähnlich wie die Zweisystemlösungen in Saarbrücken und Karlsruhe ergibt sich die zweite Applikation auf dem Markt, wenn existierende elektrische Stadtbahnsysteme durch Nutzung von nicht elektrifizierten Regionalbahnstrecken ihr Angebot erweitern wollen und dem Bürger umsteigefreien Service „aus der Region in die Stadtmitte“ anbieten wollen.

Für Fall 2 wird notwendigerweise das autonome Fahrzeug gebraucht, wenn man diese Strecken nicht elektrifizieren will. Da das Basisfahrzeug für diese Anwendung ein elektrisches Stadtbahnfahrzeug ist, bietet sich als Lösung ein Hybridfahrzeug an. Als

Zusatzausrüstung müsste ein Stromerzeuger und ein Energiespeicher an Bord genommen werden. Bei richtiger Auslegung würde der Stromerzeuger die „mittlere Leistung“ des Fahrspiels erzeugen und der Energiespeicher neben seiner Energiesparfunktion die Spitzenströme für das Beschleunigen zur Verfügung stellen. Ein solches Fahrzeug hätte noch den Charme, dass es in besonderen Bereichen (lärmgeschützte Zonen, Bahnhof) des nicht elektrifizierten Netzes auch stückweise vollkommen emissionsfrei betrieben werden könnte. Diese Hybridlösung unterscheidet sich insofern von der automobilen Lösung, dass der Hauptantrieb immer noch elektrisch ist. Im Automobil wird zurzeit die Lösung mit dem Verbrennungsmotor als direkt wirkender Hauptantrieb umgesetzt und ein Elektromotor wird über ein Summiergetriebe integriert. Der Elektromotor läuft generatorisch mit und lädt den elektrischen Energiespeicher, wenn im System Energieüberschuss anfällt (z.B. beim Bremsen).

Für Fall 1 bieten sich zwei Lösungen an, um auf die Oberleitung zu verzichten. Entweder man entwickelt eine unterflurige Energieverteilung als Alternative zur Oberleitung und löst damit alle Probleme der Zuverlässigkeit bei allen klimatischen Bedingungen (Wasser, Sand, Salz,...) und der Sicherheit gegenüber dritten Verkehrsteilnehmern (Berührungsschutz). Solche geschlossenen Systemlösungen sind teuer, sind bezüglich der gerade genannten klimatischen Bedingungen kritisch zu bewerten und schränken die freizügige Fahrzeug(ersatz)beschaffung für die Betreiber ein. Als bessere Alternative akzeptiert man eine begrenzte Reichweite der Fahrzeuge im Betrieb (ca 500 m) und setzt elektrische Energiespeicher ein, die man zur Erweiterung der oberleitungsfreien Streckenabschnitte an den Haltestellen (Bild 4) nachlädt.



Bild 4: Projektbild einer Haltestelle mit Nachladefunktion über den Stromabnehmer

Die Fahrversuche mit dem Prototypfahrzeug in Mannheim, das nur mit einem Energiespeicher einer Kapazität von 1kWh ausgerüstet war und nur über ein angetriebenes Drehgestell verfügte, haben folgende Ergebnisse gezeigt:

- Maximale Fahrstrecke ohne Verbindung zur Oberleitung: 500 m
- Maximale Fahrgeschwindigkeit: 26 km/h

Das heißt, dass Fahrzeuge, die nur für den Energiesparbetrieb ausgerüstet sind, bereits Räumfahrten bei gestörter Oberleitung durchführen können oder im Depot ohne Oberleitung Werkstattfahrten machen können. Beides sind Lösungen für manch kleines betriebliches Problem.

Diese Ergebnisse sind sehr Erfolg versprechend für die Projektierung eines Serienfahrzeuges.

Ein Serienfahrzeug (30m) würde zwei *MITRAC* Energy Saver erhalten (Bild 5), bestückt mit der neuesten Generation von Super Kondensatoren. Mit dieser Ausrüstung kann normaler Fahrbetrieb ohne Oberleitung bis 500m garantiert werden. Falls die oberleitungsfreie Strecke über mehrere Haltestellen hinausgehen sollte, würde in den Haltestellen der Energiespeicher nachgeladen (docking station). Rechnungen ergaben, dass die Energiespeicher innerhalb von 20 s vollständig geladen werden können mit normalen Stromabnehmer unter Verwendung eines geeigneten Kontaktstücks als „Ersatz Oberleitung“.

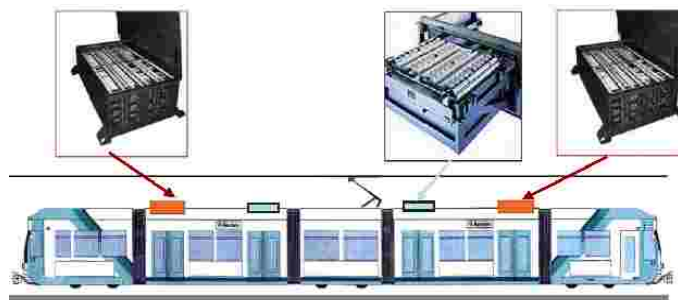


Bild 5: Redundante Ausstattung eines Serienfahrzeugs
(zwei *MITRAC* Energy Saver und die Fahrzeugbatterie)

Außergewöhnliche Betriebsfälle wie der Ausfall eines Drehgestells oder eine Wegblockade durch ein Verkehrshindernis werden durch das Redundanzkonzept abgefangen. Im schlimmsten Fall (beide Energiespeicher sind leer und das Fahrzeug hat weder Kontakt zur Oberleitung noch zur docking station) steht noch der Energieinhalt der normalen Fahrzeugbatterie zur Verfügung, der in der Regel bei ca. 8 kWh liegt. Mit dieser Energie kann das Fahrzeug eine Schleichfahrt über mehr als 500 m mit ca. 3...5 km/h vornehmen. Bevor dies eintritt sind aber sicher alle Passagiere ausgestiegen, was bei ebenerdigem Betrieb in der Stadt angesichts einer außergewöhnlichen Situation vertretbar sein dürfte.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Überblick gegeben bezüglich der Möglichkeiten mittels Energiespeichern an Bord von Straßen- und Stadtbahnen neue Potentiale zur Energieeinsparung zu erschließen und neue betriebliche Anwendungen darzustellen. Die bevorzugte Technik von Bombardier in diesem Umfeld ist die elektrische Speichertechnologie mittels Super Kondensatoren (UltraCaps). Die Super Kondensatoren haben eine junge Geschichte und es ist zu erwarten, dass noch einige Quantensprünge in der Performance erfolgen sowohl in der technischen Leistung als auch in der Degression der Preise. Heutige UltraCaps sind per Einheit mit 3000 F bei 2,7 V und 5,5 Wh/kg zu erhalten. Es wird von neuen Dielektrika gesprochen, die höhere Spannungen zulassen, was sehr hilfreich wäre, da bei der Energiebetrachtung die Spannung im Quadrat eingeht. Hybride Technologien sind für die geschilderten Anwendungsfälle von großem Interesse und tragen neben der Energieeinsparung auch zur Reduktion des Ausstoßes von CO₂ dar.

Es wird sehr spannend werden, wie sich die Wasserstofftechnologie in Zukunft entwickeln wird, allerdings halten wir es nicht für sinnvoll, nach dem geförderten Programm für die Erprobung von Bussen Applikationen auf der Schiene zu bauen, bevor nicht der kommerzielle Durchbruch der Wasserstofftechnologie beim Automobil erfolgt ist.