

# KLEINBUS "TOHYCO-RIDER" MIT SAM-SUPERKAPAZITÄTENSPEICHER

## Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

**Vinzenz V. Härrli, Hochschule Luzern Technik & Architektur**

Technikumstrasse 21, 6048 Horw

vinzenz.haerri@hslu.ch, <http://www.hslu.ch/iiee>

**Hansjörg Riesen, Hochschule Luzern Technik & Architektur**

Technikumstrasse 21, 6048 Horw

hansjoerg.riesen@hslu.ch, <http://www.hslu.ch/iiee>

**Paul Schweizer, Hochschule Luzern Technik & Architektur**

Technikumstrasse 21, 6048 Horw

paul.schweizer@hslu.ch, <http://www.hslu.ch/iiee>

**Donato Carriero, Hochschule Luzern Technik & Architektur**

Technikumstrasse 21, 6048 Horw

**Patrick Collins, Hochschule Luzern Technik & Architektur**

Technikumstrasse 21, 6048 Horw

**Titelblatt:**

Foto links: Der TR-Bus an der Haltestelle Bahnhof. Im Vordergrund die induktive Ladespule IPT.

Foto rechts: Der TR-Bus an der Haltestelle Verkehrshaus neben der Info-Säule

Abbildung Mitte: Plan der Pilotbetriebstrecke 2004 Bahnhof Luzern - Verkehrshaus

**Impressum**

Datum: Oktober 2008

**Im Auftrag des Bundesamt für Energie**, Forschungsprogramm Verkehr & Akkumulatoren

BFE-Projektnummer 29963

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

Bezugsort der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	4
1. Projektziele.....	5
2. Ausgeführte Arbeiten.....	6
2.1 Projektleitung.....	6
2.2 Fertigstellung Umbau und Neuverkabelung des Busses.....	7
2.3 Überarbeitung der Regel- und Steuerungsstrukturen.....	8
2.4 Bewilligungen und Zulassungen.....	9
2.5 Installation Halte und Lade-Stationen.....	10
2.6 Einsatz des TR-Busses.....	12
2.6.1 Pilotbetrieb 2004.....	12
2.6.2 Messfahrten März 2006.....	12
2.6.3 Ausstellungsbetrieb 2006.....	12
3. Resultate: Betriebserfahrungen und energetische Auswertungen.....	13
3.1 Einleitung.....	13
3.2 Betriebserfahrungen aus dem Pilotbetrieb 2004.....	14
3.3 Energetische Auswertungen der Messfahrten im März 2006.....	14
3.3.1 Einleitung.....	14
3.3.2 Auswertungen des Fahrbetriebs 2006.....	14
3.3.2.1 Messstrecke und Ladestationen.....	14
3.3.2.2 Energiegewinn durch Rekuperation einer typischen Messfahrt.....	15
3.4 Bedeutung der Supercaps im Vergleich mit anderen Energiespeichern.....	18
3.4.1 Vorgehensmethodik zum Vergleich der Supercaps.....	18
3.4.2 Die Supercap-Lösung des TR-Busses als Ausgangspunkt.....	19
3.4.3 Alternativer Einsatz von Bleibatterien.....	19
3.4.3.1 Bleibatterien für ganzen Tagesverbrauch.....	19
3.4.3.2 Bleibatterien mit gleichem Gewicht wie bei der SCAP Lösung.....	20
3.4.3.3 Bleibatterien mit weniger Gewicht wie bei der SCAP Lösung und häufigem Laden.....	21
3.4.4 Alternativer Einsatz von ZEBRA Batterien.....	22
3.4.4.1 ZEBRA Batterie für ganzen Tag.....	22
3.4.4.2 ZEBRA Batterie mit einmaliger Tagesnachladung.....	23
3.4.5 Analyse der Ergebnisse.....	24
3.4.5.1 Zusammenstellung der wichtigsten Daten.....	24
3.4.5.2 Neue Möglichkeiten mit SCAPs und Lithium-Ionen Batterien.....	24
3.4.5.3 Effizienz- und Verlustbetrachtungen.....	26
3.4.5.4 Allgemeine Diskussion der Ergebnisse, Zusammenfassung.....	30
3.5 Energetische Auswertungen des VHS-Betrieb 2006.....	31
3.5.1 Einleitung.....	31
3.5.1.1 Mit dem Historienspeicher aufgezeichnete Werte.....	31
3.5.1.2 Zur Qualität der Messdaten.....	31
3.5.2 Vorgehen bei der Auswertung der Aufzeichnungen.....	32
3.5.3 Prozentualer Rekuperationsgrad pro Fahrt.....	32
3.5.4 Rekuperationsgrad extrahierter Beschleunigungs- und Bremssteilzyklen.....	34
3.5.5 Betriebserfahrungen aus dem VHS-Betrieb 2006.....	38
3.6 Analyse des Verhaltens der SAM (Supercap)-Module.....	38
3.7 Die Auxiliary-Verbraucher.....	39
3.7.1 Statische Aufnahme.....	39
3.7.2 Diskussion der Auxiliary-Werte.....	40
3.7.3 Zur Bedeutung des Energiebedarfs für die Auxiliaries.....	40
4. Öffentlichkeitsarbeit.....	41
5. Diskussion, Schlussfolgerungen und Ausblick.....	42
6. Dank.....	44
7. Glossar.....	45
8. Referenzen.....	46
Anhang: Kommentierter Bildbericht.....	47

## Zusammenfassung

Nachdem im Jahre 2003 an der sicheren und zuverlässigen Performance des TOHYCO-Rider Kleinbusses mit Superkapazitäten gearbeitet wurde, standen im 2004 vor allem die Vorbereitungsarbeiten und die Durchführung des Pilotbetriebes zwischen dem Bahnhofplatz Luzern und dem Verkehrshaus im Mittelpunkt.

Dazu waren wesentliche projektorganisatorische Arbeiten nötig. Partnerabsprachen, Bauleitung der Einbauarbeiten IPT (Ladespulen, Inductive Power Transfer), Abnahmen, Konzessionserteilung sowie Begleitung des Pilotbetriebs sind hier zu nennen. Ebenso wurden parallel Marketingaktivitäten in Zusammenarbeit mit dem Verkehrshaus und dem ÖVL (Zweckverband öV Luzern), vorab Haltestellengestaltung, Herstellung eines Flyers und Durchführung einer Medienkonferenz am 17.8.04, bearbeitet. Durch die völlige Umgestaltung des Busses standen auch noch technische Arbeiten an. Für die Schlussmontage mussten etliche Probleme gelöst werden. Die Inbetriebnahme der 24 SAM-Teilmodule stellte sich als sehr aufwendig heraus. Die Schlussinbetriebnahme des neuen Regelungskonzeptes verlangte bis zur zufriedenstellenden Arbeit ebenfalls viele Nachbesserungen. Diese Arbeiten bedingten einen verspäteten Beginn des Pilotbetriebs.

Der Pilotbetrieb 2004 selber zeigte auf, dass das Grundkonzept des Antriebs mit nur Superkapazitäten und der IPT Ladung sehr zufriedenstellend arbeitet und ein sehr effizienter Betrieb möglich ist. Der Energiebedarf lag unter dem Referenzwert von 0.1kWh pro Kilometer und pro Tonne. Dieses Ergebnis konnte dank der guten Rekuperation, die durch die SCAPs ermöglicht wird, erzielt werden. Der Anteil der Einsparungen durch die Rekuperation betrug bei Fahrten mit typischem Stop & Go Anteil um die 12%. Es liess sich zeigen, dass das Potential bei grösseren Geschwindigkeiten (50km/h) durchaus bei 30% liegen kann. Abgesehen von kleineren Pannen arbeitete das Grundsystem mit den Supercaps einwandfrei.

Im Jahre 2006 wurden zusätzliche Messfahrten und ein zweiter Versuchsbetrieb durchgeführt. Von Mai bis Oktober 2006 war der TOHYCO-Rider nämlich Teil der Sonderausstellung „Top oder Flop“- im Verkehrshaus der Schweiz (VHS). Im Rahmen dieser Ausstellung konnten die Museumsbesucher an vier Tagen pro Woche einer Fahrt im TR-Bus rund um das Verkehrshaus beiwohnen. Während dieses Betriebs lief die ganze Zeit das eigens entwickelte Diagnose- und Datenaufzeichnungsgerät, mit dessen Auswertungen umfangreiche Energiebetrachtungen angestellt werden konnten. Daraus ging hervor, dass der TR-Bus, je nach Geschwindigkeit und Bremsverzögerung, bis zu 49% Energiegewinn zu rekuperieren vermag, wenn die Beharrungsphase auf derselben Geschwindigkeit minimal ist. Es werden drei spezielle Messungen, die auf 10%, 31% und 49% Energieeinsparungen führen, vorgestellt.

Im Bericht wird anhand der Blei, NaNiCl und Li-Ionen Technologien auch ausgeführt, wieso die Supercaps gegenüber Batterien für den Stop & Go Betrieb bedeutende Vorteile bei verschiedenen Einsatzszenarien aufweisen. Li-Ionen Technologien zeigen allerdings heute Performances, welche den Supercaps Vorteilen sehr nahe kommen. Diese Entwicklung sollte deshalb genau beobachtet werden.

Ein wichtiges Augenmerk galt dem Verbrauch der Auxiliaries (Hilfsbetriebe), der zusätzlich zur Traktionsenergie in starkem Masse zu Buche schlägt. Diese Auxiliaries trüben vor allem bei langen Halts (Rotlichter, Stau) die Energiebilanz massiv.

Im Anschluss an den erfolgreichen Abschluss der beiden Einsätze 2004 und 2006 wird nun aktuell an der weiteren Industrialisierung und Vermarktung des Konzeptes und der Komponente SAM gearbeitet.

Der Pilotbetrieb hat erfreulicherweise zu den erwarteten Folgeprojekten geführt: Der Supercap Speicher SAM wird als dritte Generation über einen Drittanbieter in Projekten eingesetzt, Bus Folgeprojekte sind geplant und Kontakte zu Buszulieferanten und -hersteller konnten etabliert und Kooperationen gestartet werden.

Dieses Busprojekt darf damit als sehr erfolgreich gewertet werden. Es leistet auch einen wesentlichen Lösungsbeitrag an die Thematik "Living & Mobility", die strategisch vom CC IIEE verfolgt wird und sich grundsätzlich mit der Frage beschäftigt, wie Wohnen, Mobilität und Energieversorgung gescheit aufeinander abgestimmt werden können.

## 1. Projektziele

Die zu erreichenden Ziele des Projektes „TOHYCO-Rider“ mit Superkapazitäten wurden bereits ausführlich dokumentiert. Die bisher erreichten Ziele sind in mehreren Berichten [1 bis 5, 14 und 15] dokumentiert.

Anschliessend an die Zielsetzung des Jahres 2003 [15] ging es von 2004 bis 2006 um folgende Ziele:

- Professionelle Projektleitung um der Komplexität des Projektes und der Beteiligung einer grossen Anzahl von Partnern gerecht zu werden
- Installation der nötigen Infrastruktur (Halte- und Lade-Stellen)
- Fahrzeug für einen sicheren Pilotbetrieb fertig stellen und vorbereiten
- Einholen aller für den Pilotbetrieb nötigen Bewilligungen und Zulassungen
- Durchführen des Pilotbetriebs
- Nachweisen der Energieeffizienz, Zuverlässigkeit und Alltagstauglichkeit des TR-Busses
- Akquisition und Etablierung von Folgeprojekten
- Energetische Auswertungen der Aufzeichnungen aus den Pilotbetrieben 2004 und 2006

## 2. Ausgeführte Arbeiten

In den folgenden Abschnitten werden die geleisteten Arbeiten und Ergebnisse am Projekt "TOHYCO-Rider" während der Projektphase 04 dokumentiert. Für Abkürzungen konsultiere man bitte das Glossar im Kap. 6.

### 2.1 PROJEKTLEITUNG

Im Bericht 2003 wurde bereits die Zielsetzung, einen halbjährigen Pilotbetrieb zwischen dem Bahnhofplatz Luzern und dem Verkehrshaus zu lancieren, erwähnt [5]. Die Hauptaufgaben waren:

- Finanzierung
- Standortevaluationen
- Betriebskonzept
- Risikoanalysen und Pendenzen Erfassung
- Planung und Controlling

Obwohl das Projekt 2003 schon bearbeitet wurde, war die vollständige Finanzierung lange Zeit noch ungewiss. Die definitive Finanzierung konnte im Dezember 2003 erreicht werden.

Ein attraktiver, prominenter Pilotbetrieb verlangt gute Haltestellen-Standorte. Besonders der Standort beim Bahnhofplatz Luzern war aufgrund des dichten öffentlichen Verkehrs und der verschiedenen Interessen keineswegs klar. Die notwendigen Bewilligungen konnten alle eingeholt werden, womit dem geplanten Betrieb nichts mehr im Wege stand.

Nebst den Hauptfinanzierungspartnern BFE, Energiefonds der Stadt Luzern sowie der FHZ (Abkürzungen vgl. Glossar) sind für den Pilotbetrieb einige der Partner sehr zentral in das Projekt eingebunden. Der Zweckverband öffentlicher Agglomerationsverkehr Luzern (ÖVL), das Verkehrshaus der Schweiz (VHS), die Stadt Luzern, sowie die städtischen Verkehrsbetriebe haben einem gemeinsam erarbeiteten Betriebskonzept zugestimmt.

Ein öffentlicher Pilotbetrieb ist für ein Prototyp-Forschungsprojekt einer Fachhochschule nicht selbstverständlich. Obwohl eine gewisse Toleranz für Störungen durchaus vorhanden sein mag, besteht doch eine sehr grosse Herausforderung darin, das Fahrzeug in einem industriellen Standard so vorzubereiten, dass ein sicherer und zuverlässiger Betrieb möglich ist. Entsprechend wurden dafür Aufwendungen für die Risikoanalyse getätigt und Risikostrategien für verschiedene mögliche Ereignisse formuliert.

Ein nicht unbedeutender Aufwand bestand in der Planung und dem Controlling dieses umfangreichen Projekts, das von der FHZ initiiert und mit allen Industriepartnern koordiniert wurde.

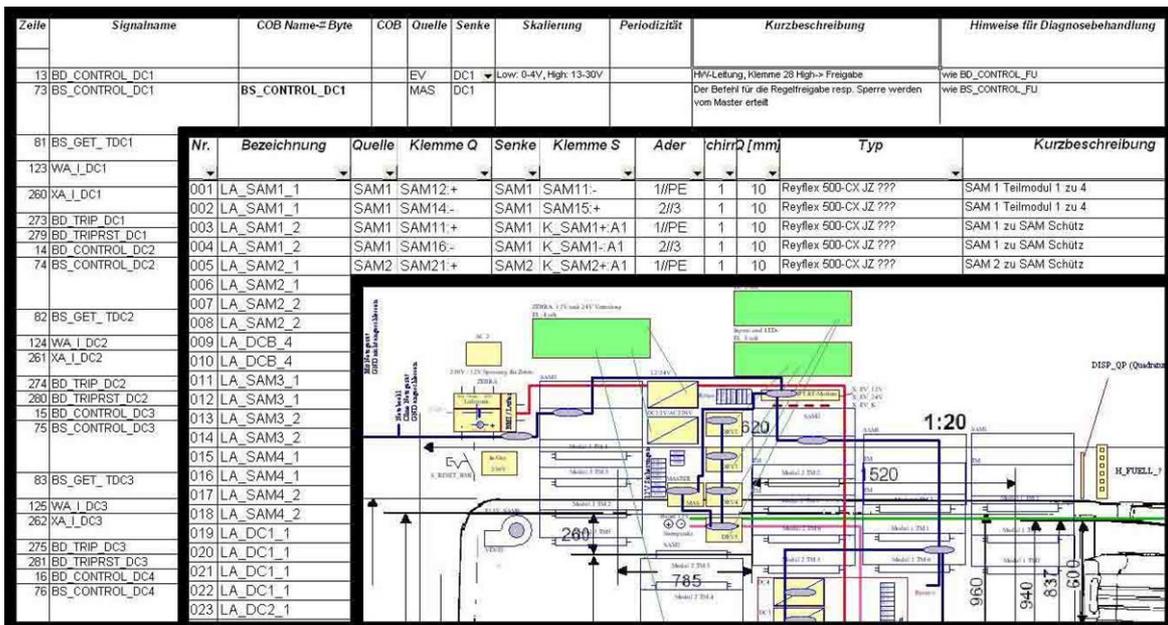
## 2.2 FERTIGSTELLUNG UMBAU UND NEUVERKABELUNG DES Busses

Im Jahresbericht 03 [15] wurde erwähnt, dass die Optimierungsarbeiten an den SAM-Modulen ein Umbau des Busses verlangten. Für den Pilotbetrieb mussten deshalb der Umbau und die Neuverkabelung in den ersten Monaten des Jahres 04 fertig gestellt werden.

Um ein Platzproblem zu verhindern, wurde die Disposition aller Komponenten im Fahrzeug, unter Beachtung von EMV-Aspekten, sehr genau geplant. Die wachsende Zahl an Zusatzgeräten erschwerte die Arbeit fortlaufend. Die gesamte Mechanik für den Energiespeichereinbau musste neu erstellt und die Sitzflächen ebenfalls neu verkleidet werden.

Die elektrische Verkabelung der Leistungselektronik sowie der Steuerelektronik erwies sich als sehr komplex, da sehr viele Randbedingungen einzuhalten waren. Um die Arbeit zu erleichtern und um eine gute Nachvollziehbarkeit zu erreichen, wurde die Arbeit in mehreren Dokumenten niedergeschrieben. Die wichtigsten werden nachfolgend aufgelistet (vgl. auch Fig. 1):

- **Elektro-Schemas:** Enthalten alle elektrischen Komponenten, die physikalischen Verbindungen und die Angabe der Disposition (Lage im Bus).
- **Kabelliste:** Auflistung aller Punkt-zu-Punkt Verbindungen mit Angabe von Leitertyp, Querschnitt, Farbe und Bezeichnung der einzelnen Adern.
- **Signalliste:** Auflistung aller auf dem CAN-Bus vorhandenen Software Signalen mit Angabe von Quelle/Senke, Periodizität, Datenmenge, etc.



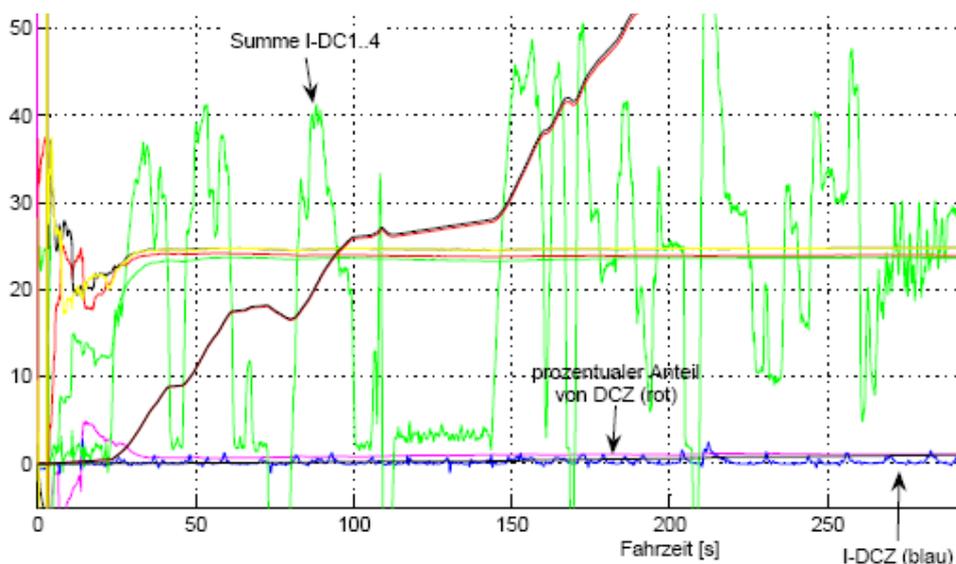
Figur 1: Ausschnitte aus Signalliste, Kabelliste und Elektro- Schema

Durch das neue Design der Verkabelung konnten Störeinträge der leistungsführenden Leitungen auf Signal- und Datenbuskabel vermindert werden. Zusätzlich garantieren die sauber nachgeführten Unterlagen eine schnelle Fehlerlokalisierung im Falle einer Störung.

Das gesamte Sicherheitskonzept wurde überarbeitet und mit zusätzlichen Schutzeinrichtungen ergänzt. Die eingesetzten Sicherungen sind mit einem Überwachungskontakt ausgerüstet, und dessen Zustand kann auf dem Fahrer-MMI (Anzeige) kontrolliert werden. Zudem sorgt ein Isolationsmessgerät für die elektrische Sicherheit des Fahrzeuges und der Fahrgäste, indem es elektrische Verbindungen von spannungsführenden Teilen auf das Chassis sofort detektiert.

### 2.3 ÜBERARBEITUNG DER REGEL- UND STEUERUNGSSTRUKTUREN

Die Regel- und Steuerstrukturen wurden überarbeitet und mittels Simplorer [13,15] simuliert. Nun ging es darum, die simulierten Strukturen zu implementieren, die Werte in die Regelung zu übernehmen und die Inbetriebnahme des Fahrzeugs durchzuführen. Besonders das „fine-tuning“ der Regelungsparameter entpuppte sich als sehr aufwendig. Ein systematisches Vorgehen in Teilschritten war notwendig. Das Endresultat ist sehr zufriedenstellend. Die Regelung ist stabil und unempfindlich auf Störeinflüsse. Die vom Antrieb verlangte Leistung wird gleichmässig von den vier aktiven SAM-Modulen geliefert. Fällt ein Modul aus, wird die Leistung ohne Unterbruch durch die drei verbleibenden Module erbracht. Die maximal mögliche Leistung wird dabei reduziert. Die ZEBRA-Batterie kommt bei genügendem Energievorrat in den Modulen nicht zum Zuge. Es war eines der wichtigsten Ziele, dass nur die SCAPs die Leistungsspitzen decken sollen. In Fig. 2 ist erkennbar, dass der ZEBRA Batteriestrom nur leicht um die 0-Linie pendelt. Der Anteil beläuft sich nur auf ca. 1%.



**Figur 2:** Das Ziel der Regelung ist erreicht: der ZEBRA-Batterie Leistungsanteil ist minimal ("I-DCZ", blau)

Die Regelung ist so ausgelegt, dass ohne weiteres Zutun die Zebra Batterie unmerklich Energie liefert, wenn die Supercaps vorzeitig leer sein sollten. Für Notfallsituationen ist der manuelle Mode „MANU-Mode“ implementiert worden. Diese Betriebsart garantiert auch bei Störungen an den Regel- und Steuerstrukturen, wie z.B. Ausfall der CAN-Kommunikation, einen redundanten Betrieb ab ZEBRA-Batterie. In diesem Mode wird die vom Antrieb verlangte Leistung auf die von der ZEBRA-Batterie zur Verfügung stehende Leistung begrenzt. Für die Fahrt zwischen Bahnhof und Werkstatt, wo keine IPT-Ladestation zur Verfügung steht, war dieser Mode ebenfalls von grossem Nutzen.

Die Regelung der Fahrparameter rund um die Drehzahl null verlangten zusätzliche Aufwendungen. So musste beispielsweise die Reversion (Rückwärtsfahren) beim Betätigen der elektrischen Bremse verhindert werden. Für das Laden konnte dieselbe Regelstruktur verwendet werden, welche zum Fahren eingesetzt wird. Übergeordnet wurde eine Steuerung vorgesehen, die das Laden einleitet und überwacht. Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation wird mittels Funkverbindung (Funkmodem) und einem sicheren Protokoll erstellt, wie dies im Jahresbericht 2003 [15] spezifiziert wurde.

Die Automatismen im TR-Bus wurden soweit ausgereift, dass der Fahrer zusätzlich zu den üblichen Steuerelementen in einem Fahrzeug nur drei weitere Wahlschalter betätigen muss, um den Bus zu fahren. An der Ladestation kann der Ladevorgang durch Drehen eines einzelnen Schalters gestartet werden. Während der Fahrt wird der TR-Bus wie ein „normales“ Elektrofahrzeug bedient.

## 2.4 BEWILLIGUNGEN UND ZULASSUNGEN

Vor dem Start des Pilotbetriebs mussten diverse Bewilligungen und Zulassungen erlangt werden. Die Einzigartigkeit und die komplexe Technik des TR-Busses erschweren diese Arbeit. Für die Projektleitung war es eine besondere Herausforderung alle Bewilligungen und Zulassungen fachgerecht zu bearbeiten und termingerecht zu erhalten. Bemerkenswert ist auch die Vielfalt der hier involvierten Instanzen, vom BAV (Bundesamt für Verkehr) bis hin zur Stadtgärtnerei Luzern.

Zusammengefasst wurden folgende Normen eingehalten sowie Abnahmen und Bewilligungen eingeholt:



**Figur 3:** Übergabe des LU-Kontrollschilts durch Herrn Kurmann, STVA Kt. Luzern nach erfolgreicher Abnahme

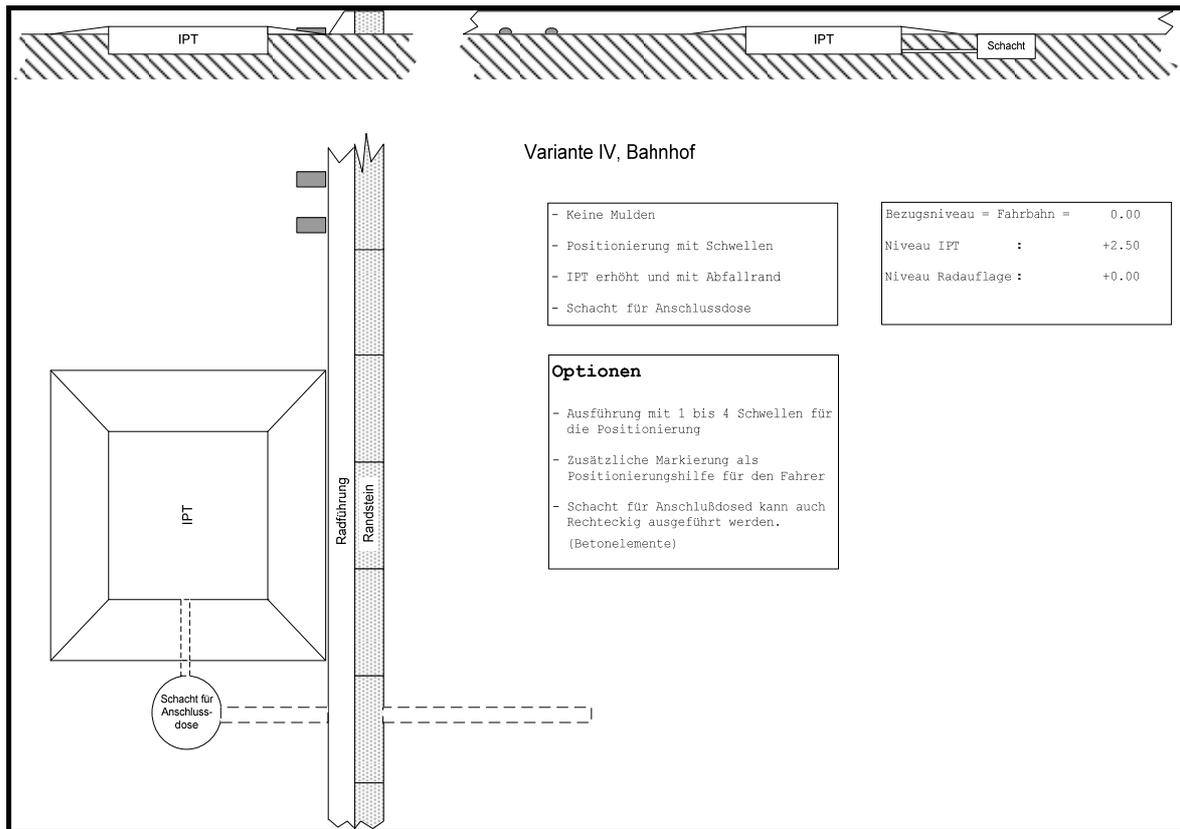
- Einhalten der gängigen Normen im Sinne der elektrotechnischen Vorschriften und des Strassenverkehrsgesetzes
- Durchführung der elektrischen Prüfung und Abnahme durch den SEV
- Abklärung der Führerkategorie. Wer darf dieses Fahrzeug lenken?
- Vorführung beim Strassenverkehrsamt (BAV) unter spezieller Berücksichtigung des Einsatzgebietes öffentlicher Verkehr (vgl. Fig. 3)
- Erreichung einer höheren Bremsleistung und Achsengarantie bedingt durch das zusätzliche Gewicht
- Abnahme des Fahrzeuges durch das BAV bezüglich Konzessionserteilung
- Erreichen der Konzessionserteilung
- Einlösen des Fahrzeuges im Flottenvertrag des Kantons Luzerns
- Bewilligung zur Benutzung der Busspur

Für die Installationen an den Haltestellen waren folgende Bewilligungen nötig:

- Bewilligung zur Benutzung des Bahnhofplatzes (Busbetriebe, SGV, Stadt Luzern)
- Bewilligung der Gewerbepolizei zur Verwendung des Halteplatzes beim Quai 2
- Bewilligung für Bauarbeiten am Quai 2
- Einverständnis der Stadtgärtnerei für Bauarbeiten am Quai 2
- Gastrecht der SVG für Einbau Schaltschrank im Billetthaus am Quai 2
- Einverständnis Verkehrshaus (VHS) zum Einbau der Ladespule vor dem IMAX
- Überfahrrecht in der Fussgängerzone vor dem VHS

## 2.5 INSTALLATION HALTE UND LADE-STATIONEN

Die Ladung des TR-Busses wird mit einer induktiven und somit berührungslosen Energieübertragung (IPT) vorgenommen. Die IPT besteht aus zwei Spulen: die Primärspule, welche die Energie liefert und die Sekundärspule (oder Pick-Up), welche die Energie aufnimmt. Die Primärspule wird in die Fahrbahn eingelassen und die Sekundärspule an der Unterseite zwischen den beiden Achsen des Fahrzeuges montiert. Um einen akzeptablen Wirkungsgrad der Energieübertragung zu erhalten, muss der Luftspalt zwischen den beiden Spulen  $< \text{ca. } 40\text{mm}$  sein. Aus diesem Grund musste die Primärspule durch bautechnische Maßnahmen so in die Fahrbahn integriert werden, dass sich dieser Abstand einstellen lässt. Zudem musste dafür gesorgt werden, dass die Fahrer die korrekte Position über der Sekundärspule ohne größeren Aufwand anpeilen können. Zu diesem Zweck wurden Konzepte für die Bauarbeiten an den Haltestellen erarbeitet. Fig. 4 zeigt einen Entwurf für die Ladestation am Quai 2.



**Figur 4:** Konzeptentwurf (Variante 4) für Bauarbeiten der IPT-Ladestation beim Bahnhofplatz (Quai 2)

Anfänglich wurden verschiedene Konzepte für den Standort Bahnhof und den Standort Verkehrshaus erarbeitet. Am Ende wurden aber an beiden Stellen die gleichen Arbeiten gemäss Variante 4 realisiert. Die Primärspule ragt ca. 2.5cm über aus der Fahrbahn hinaus und der Niveauunterschied wurde mit einem abfallenden Rand ausgeglichen. Diese Erhöhung braucht es, damit der zulässige Luftspalt von  $< 4\text{cm}$  eingehalten werden kann. Auf die seitliche Radführung und die Positionierungsschwellen wurde verzichtet. Nach ersten Testfahrten stellte sich heraus, dass die richtige Position lediglich durch eine Markierung auf der Fahrbahn leicht angefahren werden kann.

Fahrzeugseitig wurde am Luftfederungssystem ECAS die Niveauregelung durch eine zusätzliche Absenkungshöhe für IPT erweitert. Durch betätigen der entsprechenden Schalterwippe im Armaturenbrett senkt sich das Fahrzeug exakt auf den gewünschten Abstand von 4cm.



**Figur 5:** Einbau der IPT-Primärspule beim VHS



**Figur 6:** TR-Bus vor der Haltestelle VHS

Die Installation einer Haltestelle konnte innerhalb von zwei Arbeitstagen durchgeführt und fertig gestellt werden (Fig. 5 und 6). Dies war nur dank der guten und zuvorkommenden Zusammenarbeit mit den betroffenen Institutionen und Projektpartnern möglich. Die Organisation und Koordination der Arbeiten wurden vorbildlich durchgeführt. Die geschätzten Installationskosten für beide Standorte belaufen sich auf < 10'000.-. Das wäre im hypothetischen Vergleich mit einer Neuinstallation von 3km Oberleitungen (Bahnhof-Verkehrshaus) für Trolleybusse sehr kostengünstig.

Nebst den technischen Einrichtungen für das Laden wurde an beiden Haltestellen auch noch eine Informationssäule erstellt (vgl. Deckblatt und Fig. 6). Auf diesen als übergrosse Supercaps gestalteten „SCAP“-Säulen konnten Passanten den Fahrplan konsultieren sowie wichtige Hintergrundinformationen über das Projekt lesen.

Für den Ausstellungsbetrieb 2006 wurde die Ladeinsel vor dem VHS ausgegraben und auf dem Freigelände des VHS wieder eingebaut. Dank der reibungslosen Zusammenarbeit zwischen der Baufirma und dem VHS war dieser Umzug innert eines Vormittags vollzogen. Da die IPT-Tankstelle nach dem Ende der Ausstellung wieder entfernt wurde, wurde nur wenig Montageaufwand betrieben. So wurden die Zuleitungen der Ladespule überirdisch an der Aussenwand der Luftfahrthalle des VHS geführt.

Das IPT-Ladesystem zeigte seine Alltagstauglichkeit durch eine einwandfreie Funktion während den Testbetrieben.

Für das korrekte Anfahren der Ladeinsel wurden auch hier lediglich zwei Markierungen für die Position der Fahrzeugräder auf den Boden gemalt. Die Erfahrung zeigte, dass beim Anfahren der Ladeinsel eine Toleranz von 10 – 15 cm Abweichung von der exakten Mittelposition noch immer eine Ladung mit voller Leistung zulässt.

## 2.6 EINSATZ DES TR-BUSSES

### 2.6.1 Pilotbetrieb 2004

Im Sommer 2004 stand der TR-Bus während dreier Monate zwischen dem Bahnhof Luzern und dem Verkehrshaus der Schweiz (VHS) im Einsatz.

Während dieses Einsatzes musste sich der TR-Bus zum ersten Mal im Alltagseinsatz beweisen. Der Einsatz sollte sowohl Stärken wie Schwächen aufzeigen. Eine Zusammenfassung der gemachten Erfahrungen findet sich im Kapitel 3.2.

Sehr erfreulich war die Akzeptanz bei den Kunden. Ausnahmslos alle Fahrgäste waren fasziniert von dem Projekt und seinem Konzept. Auch die Visualisierung im Innenraum und die damit verbundenen Informationen kamen gut an. Die Passagiere können sich ein Linienbetrieb mit solchen Fahrzeugen sehr gut vorstellen.

Etwas weniger erfreulich war die Passagierfrequenz. Im Schnitt fuhren ca. 15 Personen pro Tag mit dem TR-Bus. Insgesamt nur etwa 600 Personen. Die etwas "versteckte" Lage (am Bahnhof) und die im 5min-Takt fahrenden VBL-Busse hielten Gelegenheits-Passagiere vom TR-Bus fern. Die Betriebsdauer von nur wenigen Monaten genügte auch nicht, um das Projekt hinreichend genug bekannt zu machen.

### 2.6.2 Messfahrten März 2006

Bevor der TR-Bus im Mai 2006 in den VHS-Ausstellungsbetrieb ging, wurden einige Messfahrten durchgeführt, um zuverlässige Kennwerte des Fahrzeugs in Erfahrung zu bringen. Hierfür wurde im Vorfeld ein Messkonzept erstellt und der Bus mit zusätzlichen Mess- und Aufzeichnungsgeräten ausgerüstet.

Dank diesen Aufzeichnungen war es möglich, sehr genaue Aussagen über die Funktion des Systems und seiner Energieeffizienz machen zu können.

### 2.6.3 Ausstellungsbetrieb 2006

Von Mai bis Oktober 2006 stand der TR-Bus im Verkehrshaus der Schweiz (VHS) im Betrieb. Dies im Rahmen der Sonderausstellung „Top oder Flop“, einer Ausstellung über die Innovationstätigkeit in der Schweiz, während der sehr viele interessierte Besucher Probefahrten mit dem TR-Bus machten.

Im Vorfeld dieses Betriebs wurden keine grundlegenden Änderungen am Systemdesign des TR-Busses vorgenommen. Der Grund hierfür: Zunächst sollte die Funktion des bestehenden Designs mit dem neu in Betrieb genommenen Historienspeicher beobachtet werden.

Dank diesem Historienspeicher, welcher dauernd ausgewählte Betriebsparameter aufzeichnete, konnten Kurvenverläufe von über 360 Fahrten aufgezeichnet werden. Die Aufzeichnungen erlaubten vielfältige Rückschlüsse auf Fehlverhalten und genaue Energiefluss-Analysen. Dank dieser Aufzeichnungen konnten Belege für die erhofften, guten Betriebskennwerte erbracht werden.

Details zu diesen Aufzeichnungen finden sich im nächsten Kapitel.

### 3. Resultate: Betriebserfahrungen und energetische Auswertungen

#### 3.1 EINLEITUNG

Im Zentrum des Interesses stand für alle am Projekt Beteiligten die Energieeffizienz des TOHYCO-Riders wie auch die Zuverlässigkeit des von der FHZ gebauten Systems, die durch Messungen im regelmässigen Einsatz in Erfahrung gebracht werden sollten.

Der TR-Bus wurde drei Mal ausgewertet:

1. Pilotbetrieb 2004 zwischen dem Luzerner Bahnhof und dem VHS.
2. Messfahrten im März 2006 zur Überprüfung der Performance des Busses. Hierfür wurde der Bus temporär mit zusätzlichen Mess- und Datenaufzeichnungsgeräten versehen.
3. Der Ausstellungsbetrieb im VHS 2006, bei dem der Bus einen Rundkurs rund um das Verkehrshaus fuhr. Zu diesem Einsatz war der bordeigene Historienspeicher in Betrieb, dessen Auswertung sehr interessante Erkenntnisse über die Effizienz und die Zuverlässigkeit der Supercaps zu Tage förderte.

Während beim Pilotbetrieb 2004 die korrekte Funktion des Systems „TOHYCO-Rider“ im Vordergrund stand, wurden bei den späteren Einsätzen auch umfangreiche Datenaufnahmen durchgeführt. Dank dieser Daten liessen sich die erwarteten Betriebswerte belegen.

Die Betriebserfahrungen, sowie die Bewertung der Supercaps und der Vergleich zu anderen Energiespeichern soll in diesem Kapitel abgehandelt werden. Die Struktur dieses Kapitels beinhaltet folgende Vorgehensmethodik:

- Im Kapitel 3.2 wird summarisch von den Betriebserfahrungen im Pilotbetrieb 2004 berichtet.
- Weil gezielte Messungen im öffentlichen Betrieb nicht möglich waren, wurden diese auf derselben Strecke mit Messfahrten im März 2006 nachgeholt, ausgewertet und im Kapitel 3.3 zusammengefasst.
- Darauf aufbauend werden im Kapitel 3.4 Analysen zur Bedeutung der Supercaps vorgenommen.
- Während des Versuchsbetriebs im VHS im Sommer 2006 stand der Historienspeicher im Einsatz, der zu weiteren, systematischen Messungen und den im Kapitel 3.5 beschriebenen Erkenntnissen geführt hat.
- Die Analyse der für den Bus entwickelten Supercap Module (SAM) folgt im Kapitel 3.6.
- Eine Analyse der Bedeutung der Hilfsbetriebe wird schlussendlich im abschliessenden Kapitel 3.7 vorgenommen.

### **3.2 BETRIEBSERFAHRUNGEN AUS DEM PILOTBETRIEB 2004**

Während der dreimonatigen Betriebsdauer konnten viele Erfahrungen gesammelt werden, welche sehr hilfreich für die Weiterentwicklung des Busses sind. Die erzielten Resultate sind vielversprechend. Dank der hohen Energierückgewinnung beim Bremsen mittels SCAPs konnte ein sehr guter Energiewert von unter 0.09kWh pro Tonne und pro Kilometer erreicht werden. Eine Fahrt verursachte damit Energiekosten von nur ca. 15Rp.

Der Kernteil des neuartigen Abtriebs funktionierte einwandfrei und ergab keinen Ausfall während der Betriebsdauer. Die SCAPs erwiesen sich als sehr robust. Hingegen mussten bei den Peripheriegeräten (Funkmodems, etc.) einige "Kinderkrankheiten" beseitigt werden. Dies führte zu vermehrten Ausfällen in der Anfangsphase. Ein Auffahrunfall (nur Blechschaden) verhinderte den Einsatz während einer Woche. Sonstige Störungen oder Fehlhandhabungen führten zu kleineren Aussetzern.

Die Chauffeure standen der neuen Technik sehr positiv gegenüber. Sie hatten Spass am Fahren mit dem TR-Bus. Nichtelektrische Probleme wie ein zu klein dimensionierter Kompressor oder ein nicht ganz einwandfrei funktionierender Türmechanismus waren allerdings Beeinträchtigungen, die verständlicherweise nicht geschätzt wurden.

Die oben genannten Störungen und die technische Komplexität des Fahrzeuges an sich verlangten noch einen grossen Teil an begleitendem Support. Für einen Serienbetrieb muss die Technik verständlicherweise noch ausgereifter und bedienerfreundlicher werden. Trotzdem darf festgehalten werden, dass es sich beim TR-Bus nicht um einen "Bastel-Prototypen", sondern um ein schon weitgehend teilindustrialisiertes Fahrzeug handelt.

### **3.3 ENERGETISCHE AUSWERTUNGEN DER MESSFAHRTEN IM MÄRZ 2006**

#### **3.3.1 Einleitung**

Die Messfahrten des TR-Busses im März 2006 wurden energetisch ausgewertet und stellen den eigentlichen Kernteil der Projektresultate dar. Ergänzende Messfahrten fanden zusätzlich anfangs April 2006 statt. Folgende die Ziele der Messungen standen im Vordergrund:

- Validieren der Zuverlässigkeit des Historienspeichers (Diagnosegerät, MMI)
- Erfassen des Verbrauchs der Peripherie- und Hilfsgeräte (Auxiliaries). vgl. Kapitel 3.7
- Feststellen des Energieumsatzes beim Fahren und Bremsen
- Festhalten der Wirksamkeit der Rekuperation dank der Supercaps (SAM-Module) und der damit zusammenhängenden Energieersparnis

#### **3.3.2 Auswertungen des Fahrbetriebs 2006**

Der Fahrbetrieb verdeutlichte die Zusammenhänge zwischen Rekuperations-Fahrt und Fahrt ohne Rekuperation, die Rekuperationsgewinne in Abhängigkeit von den Fahrprofilen und die Rolle die Supercaps bei der Optimierung solcher Antriebe spielen können.

Betrachtet werden vorerst nur die Traktionsenergien. Der zusätzliche Aufwand für die Auxiliaries (Hilfsbetriebe) wird in Kapitel 3.7 behandelt.

##### **3.3.2.1 Messstrecke und Ladestationen**

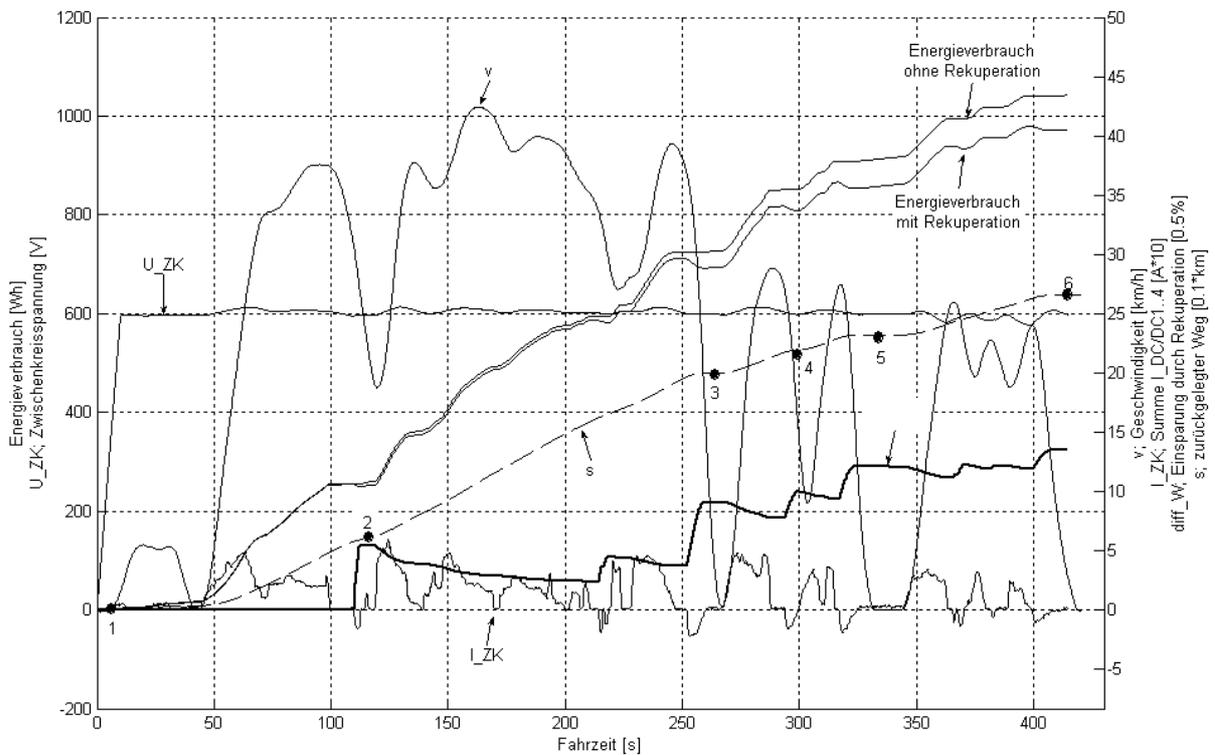
Die Messungen fanden auf der Originalstrecke des Pilotbetriebs vom Bahnhof Luzern zum Verkehrshaus der Schweiz (VHS) statt, die in Figur 7 ersichtlich ist. Die Aufnahme der Messwerte für eine Fahrt begann, bzw. endete auf den Ladespulen beim Bahnhof Luzern und beim VHS. Die Strecke misst in beide Richtungen gemittelt 2.62km. Start und Ziel haben exakt die gleiche Höhenlage von 434m über Meer. Auf der gesamten Strecke variiert die Höhenlage leicht um 9m zwischen 434müM und 443müM.



Figur 7: Originalstrecke des TR-Bus Betriebs

### 3.3.2.2 Energiegewinn durch Rekuperation einer typischen Messfahrt

Für die Analyse wurde eine aussagekräftige Messfahrt vom VHS zum Bahnhof Luzern gewählt.



Figur 8: Werteverläufe einer Fahrt vom VHS zum Bahnhof Luzern; Orte: 1. Start vor IMAX, VHS, 2. Einmündung Kreuzbuchstrasse (Ampel wechselte auf grün), 3. Luzernerhof, Hofkirche (Ampel), 4. Kolonne auf Schweizerhofquai, 5. Schwanenplatz (Ampel), 6. Ende vor Bahnhof Luzern

Figur 8 zeigt die relevanten Kurvenverläufe einer typischen Fahrt vom VHS zum Bahnhof Luzern. Dabei ergeben sich als markante Werte:

Antriebs-Energieverbrauch am Ende der Fahrt mit Rekuperation:	$W_r = 971 \text{ Wh}$
Antriebs-Energieverbrauch am Ende der Fahrt ohne Rekuperation:	$W_{or} = 1042 \text{ Wh}$
Eingesparte Energie dank Rekuperation:	$\Delta W_r = 71 \text{ Wh}$
Prozentuale Einsparung dank Rekuperation:	6.8 %
Länge der Fahrstrecke:	2.62 km
Gewicht des TR-Bus auf Messfahrt:	4.35 t
<b>Abgeleiteter Energiebedarf pro Tonne und km mit Rekuperation:</b>	<b>85.2 Wh/t-km</b>
<b>Abgeleiteter Energiebedarf pro Tonne und km ohne Rekuperation:</b>	<b>91.4 Wh/t-km</b>

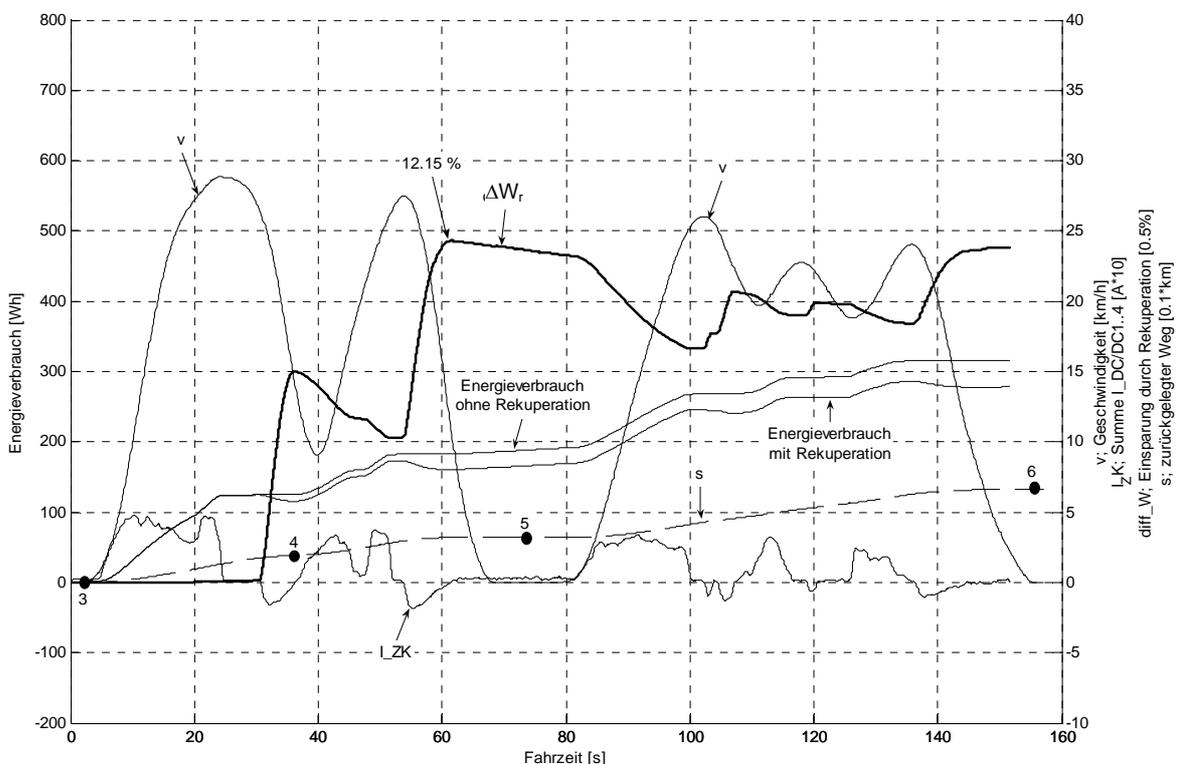
Die prozentuale Energieeinsparung von 6.8% über die ganze Fahrt wurde dabei wie folgt ermittelt:

$$\Delta W = \frac{W_{or} - W_r}{W_{or}} \cdot 100\%$$

Der sehr gute spezifische Wert von 85.2Wh/t\*km liegt deutlich unter dem allgemein bekannten, spezifischen Referenzwert von 100Wh/t\*km. Je mehr gebremst und beschleunigt wird, desto höher wird der Gewinn durch die Rekuperation. Dies erklärt, warum die prozentuale Einsparung  $\Delta W_r$  gleich beim ersten Bremsen stark nach oben springt, dann aber bei längerer Fahrt ohne Bremsen wieder abnimmt.

Beim Betrieb eines regulären Stadt-Busses wird sehr oft angefahren und angehalten, was "Stop & Go" Betrieb genannt wird. Die prozentuale wie auch die absolute Energieersparnis würden in diesem Falle gegenüber unserem gemittelten Fahrprofil aus Fig. 8 deutlich höher.

Diese Fahrt lässt sich weiter analysieren: während zwischen den Orten 1 und 3 von Fig. 8 praktisch eine Konstantfahrt vorliegt und sehr wenig Energie eingespart werden kann, zeigt der in Fig. 9 vergrößerte Ausschnitt zwischen den Orten 3 und 6 (Stadtverkehr, Hofkirche zum Hauptbahnhof) einen "Stop & Go" Betrieb, der allerdings immer noch nicht sehr viele extreme Beschleunigungen enthält.



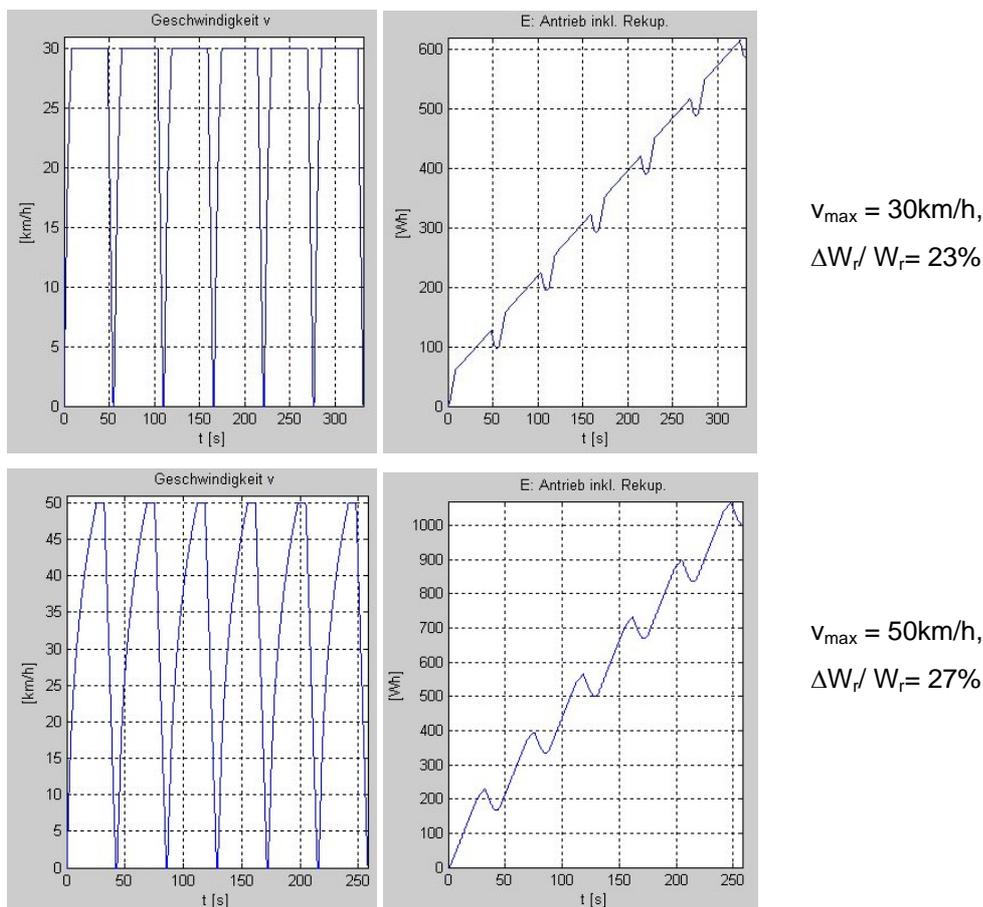
**Figur 9:** Werteverläufe des Ausschnitts von der Hofkirche bis Bahnhof Luzern; Orte: 3. Luzernerhof, Hofkirche (Ampel), 4. Kolonne auf Schweizerhofquai, Schwanenplatz (Ampel), 6. Ende vor Bahnhof Luzern

Wird nur dieser "Stop & Go" Ausschnitt betrachtet, so ergeben sich aber bereits viel bessere Werte für den prozentualen Energiegewinn dank Rekuperation:

Antriebs-Energieverbrauch am Ende der Fahrt mit Rekuperation:	$W_r = 278 \text{ Wh}$
Antriebs-Energieverbrauch am Ende der Fahrt ohne Rekuperation:	$W_{or} = 316 \text{ Wh}$
Eingesparte Energie dank Rekuperation:	$\Delta W_r = 38 \text{ Wh}$
Prozentuale Einsparung dank Rekuperation:	12.0 %
Fahrstrecke:	0.66 km
Gewicht des TR-Bus auf Messfahrt:	4.35 t
<b>Energiebedarf pro Tonne und km mit Rekuperation:</b>	<b>96.8 Wh/t-km</b>
<b>Energiebedarf pro Tonne und km ohne Rekuperation:</b>	<b>110.1 Wh/t-km</b>

Aufgrund der höheren Anzahl Beschleunigungen und Abbremsungen ist aber auch der absolute Energiebedarf pro Tonne und Kilometer wegen den Verlusten angestiegen. Die prozentuale Energieersparnis bei diesem typischen "Stop & Go" Fahrprofil ist jedoch mit 12.0% gegenüber 6.8% deutlich höher und könnte bei einem "härteren" Profil noch höher sein.

Die gefahrene Geschwindigkeit (um 28 km/h) ist relativ klein. Bei kürzerer Beharrung auf Maximalgeschwindigkeit, das heisst schnellerer Abfolge von Beschleunigungs- und Verzögerungsphase kann prozentual deutlich mehr Energie zurückgewonnen werden. Das Potential lässt sich durch eine Simulation mit MATLAB-Simulink belegen, in der eine gerundete Strecke von 2.4km in 6 Start-Stop Zyklen von Stillstand bis  $v_{max}$  zurückgelegt wird und zwar je einmal für  $v_{max} = 30\text{km/h}$  und  $v_{max} = 50\text{km/h}$ . Die Fahrzyklen ( $v, t$ ) und die Energieverläufe ( $W_r$ ) sind in Fig. 10 dargestellt.



**Figur 10:** Simulation zur Berechnung der maximal möglichen Energieeinsparung im harten "Stop & Go" Betrieb, links Fahrzyklen, rechts Energiebetrachtung

Die theoretische Ausbeute bei diesen sehr gleichmässigen Fahrprofilen liegen bei den beiden Geschwindigkeiten bei total 23% bzw. 27%! Liegt die Maximalgeschwindigkeit höher, so wird auch die mögliche Einsparung grösser, allerdings nimmt dabei aber auch der absolute, spezifische Verbrauch in Wh/t-km zu. Bei 30km/h erhält man mit 56 Wh/t-km einen sehr guten Wert, weil die Simulation gegenüber der Praxis das Streckenprofil vollständig ruhig abfährt. Es treten keine Pedalschwankungen auf. Details sind in der nachfolgenden Aufstellung ersichtlich:

	30km/h	50km/h	
Antriebs-Energieverbrauch am Ende der Fahrt mit Rekuperation:	$W_r$ [Wh]	585	1004
Antriebs-Energieverbrauch am Ende der Fahrt ohne Rekuperation:	$W_{or}$ [Wh]	764	1380
Eingesparte Energie dank Rekuperation:	$\Delta W_r$ [Wh]	178	377
Prozentuale Einsparung dank Rekuperation:	[%]	23.0	27.0
Fahrstrecke:	[km]	2.4	2.4
Gewicht des TR-Bus auf Messfahrt:	[t]	4.35	4.35
<b>Energiebedarf pro Tonne und km mit Rekuperation:</b>	<b>[Wh/t-km]</b>	<b>56</b>	<b>96</b>

### 3.4 BEDEUTUNG DER SUPERCAPS IM VERGLEICH MIT ANDEREN ENERGIESPEICHERN

#### 3.4.1 Vorgehensmethodik zum Vergleich der Supercaps

In diesem Kapitel sollen die Supercaps mit der Auslegung von anderen Energiespeichern verglichen werden. Dabei sollen vor allem die grundsätzliche Machbarkeit, die Kosten und die Verluste betrachtet werden.

Der zu Grunde liegende Fahrzyklus und die Kennwerte sind bereits in Kapitel 3.3 beschrieben und decken sich mit dem im Jahre 2004 durchgeführten Pilotbetrieb. Wir gehen also von folgenden Annahmen aus:

- Typisch 10h Einsatz am Tag,
- 3 mal pro Stunde vom Bahnhof zum Verkehrshaus und zurück,
- total wären das also 60 Einzelfahrten, was
- bei einer Strecke von 2.62km
- eine totale tägliche Strecke von 157.2km ergibt!
- Massen (1 Person wird mit 75kg gerechnet):

Busgewicht gemäss Kapitel 3.3, inkl. 2 Personen	4350 kg
Gewicht Supercap SAM Module inkl. Umrichter	544 kg
Gewicht Bus ohne Supercaps, 0 Personen	3656 kg
Zuladung 11 Personen (inkl. Fahrer)	825 kg
Spezifischer Energieverbrauch gemäss Kapitel 3.3	85 Wh/km-t

Es werden der Supercap-Lösung nun nachfolgend zwei Varianten mit Blei- und ZEBRA (NaNiCl) Batterien gegenübergestellt, wobei die Anzahl Ladungen bzw. Nachladungen pro Tag ein wichtiger Faktor darstellt.

Modernere Technologien mit Lithium-Ionen Zellen werden in der Diskussion in Kapitel 3.4.5.1 erwähnt.

Für den Vergleich mit einem Batterie-Betrieb sind verschiedene Szenarien denkbar:

1. Vergleich mit einem Bus, der den Tagesbedarf mitnimmt (Kapitel 3.4.3.1 und 3.4.4.1)
2. Betrieb mit gelegentlich längeren Ladungen an den Endstationen (Kapitel 3.4.3.2 f. und 3.4.4.2).

Ein drittes Szenario könnte der Betrieb mit Schnellladung der Batterien innerhalb von 3min nach jeder Teilfahrt, wie beim TOHYCO-Rider Bus, sein. Da Batterien nicht schnell genug geladen werden können, wird dieser Fall hier aber nicht behandelt. Bemerkungen dazu finden sich auch in Kap. 3.4.5.1 zum Thema "Li-Ionen Very High Power".

Die Auslegung der Batterien wird entsprechend der Leistungsdichte der Batterietechnologie (Blei-Säure und ZEBRA) bzw. dem Energieinhalt des Speichers erstellt.

Der Energiebedarf wird ausgehend vom messtechnisch bestimmten spezifischen Energiewert (85Wh/t-km. Kap. 3.3.2.2) ermittelt. Dies erfordert ein iteratives Vorgehen, da mit dem Berechnen des Speichergewichts auch der Energiebedarf variiert.

### 3.4.2 Die Supercap-Lösung des TR-Busses als Ausgangspunkt

Die Supercap-Lösung des TR-Busses, wie er im Einsatz stand, dient als Grundlage für den Vergleich mit anderen Speicherlösungen. Sie ist wie folgt gekennzeichnet:

*TR-Bus mit SCAPs (960 Stück x 1800F):*

*Technische Daten:*

Gewicht Fahrzeug komplett, inkl. 11 Personen	5.025 t
Energie SCAPs (75% Ausnutzung)	1125 Wh
Gewicht SCAPs inkl. Umrichter	544 kg
Reichweite/Ladung	> 2.63 km

*Wirtschaftlichkeit:*

Es sind 60 Voll-Zyklen pro Tag nötig für	157.2 km
Lebensdauer SCAPs	1'000'000 Zyklen
Ergibt eine Lebensdauer von	<b>16'667 Tage, also 45.7 Jahre!</b>

Annahme Kosten: 0.01 €/Farad (Zielpreis Maxwell):  
(1Euro= 1.6Fr.)

Speicherkosten	27'648 sFr
Theoretische Speicherkosten/Tag	<b>1.66 sFr</b>

*Machbarkeit technisch und betrieblich:*

Mit TR-Bus wurde bereits die Machbarkeit demonstriert. Die Zyklenlebensdauer der Speicher ist grösser als die Lebensdauer des Fahrzeugs! Die effektive Lebensdauer der SCAPs wird wegen Austrocknung des Elektrolyten keine 45.7 Jahre sondern eher ca. 10 Jahre dauern! Der Preis pro Tag wäre dann immer noch nur ca. 6.5 sFr.

Hinweis: Diese Betrachtung basiert in erster Linie auf den reinen Speicherkosten, die die Integration nicht beinhaltet. Allerdings wird dies auch bei den Batterien nicht berücksichtigt.

### 3.4.3 Alternativer Einsatz von Bleibatterien

#### 3.4.3.1 Bleibatterien für ganzen Tagesverbrauch

Dies ist eine rein theoretische Betrachtung, denn 5.6t Speichergewicht sind nicht möglich, ohne das Bus-Chassis und den Antrieb zu verstärken. Auch das Volumen des Speichers wäre zu gross.

*TR-Bus mit Bleibatterie 5'628kg für Tagesbedarf:*

*Technische Daten:*

Gewicht Fahrzeug komplett, inkl. 11 Personen	10.109 t (iterativ bestimmt)
Spezifische Energiedichte (Peukert 1.05 – 1.1)	30 Wh/kg
Energie Bleibatterien (bei Nutzung von 80% DOD)	135'082 Wh
Gewicht Bleibatterie (100% entsprechen 169kWh!)	5'628 kg
Reichweite/Ladung	157.2 km

*Wirtschaftlichkeit:*

Es ist ein Voll-Zyklus pro Tag nötig für	157.2 km
Lebensdauer Bleibatterien	300 Zyklen
Ergibt eine Lebensdauer von	300 Tage

Annahme Kosten:

(aktueller Preis für Batterien grosser Kapazität)	150 sFr/kWh
Speicherkosten inkl. 360.- Batteriewechsel alle 300 Tage	25'688 sFr
Speicherkosten/Tag	<b>85.63 sFr</b>

*Machbarkeit technisch und betrieblich:*

Es gilt zu beachten, dass die grosse Masse der Batterien den Energiebedarf zusätzlich massiv erhöht. Diese Lösung ist unrealistisch, weil sie eine Neukonzeption des Fahrzeugs bedingt. Das Batteriegewicht beträgt 56% des Gesamtgewichts! Das heisst, dass mehr als die Hälfte der Speicherkosten/Tag anfällt, nur um den Speicher selbst zu bewegen! Trotz preisgünstiger Speichertechnologie sind die Speicherkosten/Tag mit 85.63 sFr sehr hoch. Ein Batteriewechsel alle 300 Tage ist nicht "schön", wäre betrieblich aber machbar.

3.4.3.2 Bleibatterien mit gleichem Gewicht wie bei der SCAP Lösung

Diese Lösung erfordert 5 Schnellladungen pro Tag, d.h. es müssen 5 Ladepausen von ca. 25 Minuten im Fahrplan eingeplant werden.

*TR-Bus mit Bleibatterie von 544kg:*

*Technische Daten:*

Spezifische Energiedichte Batterie (Peukert 1.05 – 1.1)	30 Wh/kg
Gewicht Bleibatterie	544 kg
Energie Bleibatterien (bei Nutzung von 80% DOD)	13'056 Wh
Gewicht Fahrzeug komplett, inkl. 11 Personen	5.025 t
Reichweite/Ladung	30.6 km

*Wirtschaftlichkeit:*

Es sind zwischen 5 und 6 Voll-Zyklen pro Tag nötig für (Laden von 12kWh während 24Minuten mit 30kW Leistung)	157.2 km
Lebensdauer Bleibatterien	300 Zyklen
Ergibt eine Lebensdauer von	58 Tage
Annahme Kosten:	150 sFr/kWh
(aktueller Preis für Batterien grosser Kapazität)	
Speicherkosten inkl. 360.- Batteriewechsel alle 58 Tage	2'792 sFr
Speicherkosten/Tag	<b>48.14 sFr</b>

*Machbarkeit technisch und betrieblich:*

Diese Lösung ist technisch machbar, stellt aber betriebliche Anforderungen: 5 x pro Tag muss während ca. 25 Minuten der Betrieb für eine Schnellladung unterbrochen werden. Dies erfordert erheblichen Planungsmehraufwand und würde erfahrungsgemäss kaum toleriert werden, da diese nur auf wenigen Buslinien möglich wäre. Ausserdem ist ein Batteriewechsel alle 58 Tage zu häufig und bedeutet einen zu grossen betrieblichen Aufwand. Die Speicherkosten liegen viel höher als bei den Supercaps.

### 3.4.3.3 Bleibatterien mit weniger Gewicht wie bei der SCAP Lösung und häufigem Laden

Dies erfordert häufiges Laden mit IPT, ähnlich wie ein vergleichbares IPT Bus-Projekt in Genua, bei dem auch Batterien häufig nachgeladen werden. Es werden mehr Zyklen gefahren, dafür reduziert sich das Gewicht.

*TR-Bus mit Bleibatterie von 173kg. Batterie wird wie SCAP 60mal pro Tag nach jeder Fahrt geladen:*

#### *Technische Daten:*

Spezifische Energiedichte Batterie (Peukert 1.05 – 1.1)	30 Wh/kg
Gewicht Bleibatterie	173 kg
Energie Bleibatterien (bei Nutzung von 80% DOD)	4'145 Wh
Gewicht Fahrzeug komplett, inkl. 11 Personen	4.654 t
Reichweite/Ladung	10.5 km

#### *Wirtschaftlichkeit:*

Es sind 15 Voll-Zyklen pro Tag nötig für (60 mal Laden von ca.1kWh, d.h. 25% der Energie während 6 Minuten mit 10kW Leistung)	157.2 km
Lebensdauer Bleibatterien	300 Zyklen
Ergibt eine Lebensdauer von	20 Tage
Annahme Kosten:	150 sFr/kWh
(dies ist ein aktueller Preis für Batterien grosser Kapazität)	
Speicherkosten inkl. 360.- Batteriewechsel alle 20 Tage	1'137 sFr
Speicherkosten/Tag	<b>56.86 sFr</b>

#### *Machbarkeit technisch und betrieblich:*

Diese Lösung ist technisch machbar, stellt aber betriebliche Anforderungen: es wären 6 Minuten pro Ladung an IPT nötig, wobei jeweils nur 1/4 der Energie nachgeladen werden kann, weil die Schnellladefähigkeit Bleibatterien begrenzt ist. Dies ergibt für die Lebensdauerberechnung 15 Vollzyklen/Tag. Die Annahme für die Kosten ist vermutlich zu tief, weil schnellladefähige Bleibatterien teurer sind. Die Schnellladung beansprucht die Batterie nach jeder Fahrt extrem, wodurch die Lebensdauer reduziert wird. Ausserdem wäre für die Schellladung eine genaue Überwachung der einzelnen Zellen der Batterie nötig, um Überhitzungen zu vermeiden. Der Wartungsaufwand steigt zudem durch den sehr häufigen Batteriewechsel. Ein Batteriewechsel alle 20 Tage ist betrieblich vollkommen unrealistisch und die Entsorgungsproblematik wäre gravierend. Kostenmässig verhält sich dieses Beispiel ähnlich wie 3.4.3.2: Die Speicherkosten liegen viel höher als bei den Supercaps.

### 3.4.4 Alternativer Einsatz von ZEBRA Batterien

#### 3.4.4.1 ZEBRA Batterie für ganzen Tag

Da die ZEBRA Batterie eine wesentlich höhere Energiedichte als die Bleibatterie hat, ist eine Auslegung für die Abdeckung des ganzen Tagesverbrauchs möglich.

*TR-Bus mit ZEBRA Batterie von 699kg für den Tagesbedarf:*

*Technische Daten:*

Gewicht Fahrzeug komplett, inkl. 9 Personen	5.180 t
Spezifische Energiedichte ZEBRA	110 Wh/kg
Energie ZEBRA Batterie (bei Nutzung von 90% DOD)	69'217 Wh
Gewicht ZEBRA Batterie (100% entsprechen 86.5kWh!)	699 kg
Reichweite/Ladung	157.2 km

*Wirtschaftlichkeit:*

Es ist nur 1 Voll-Zyklus pro Tag nötig für	157.2 km
Lebensdauer ZEBRA Batterien	1'000 Zyklen
Ergibt eine Lebensdauer von	<b>1'000</b> Tage

Annahme Kosten:	800 sFr/kWh
(dies ist ca. ein aktueller Preis für ZEBRA Batterien)	
Speicherkosten inkl. 1000.- Batteriewechsel alle 1'000 Tage	62'526 sFr
Speicherkosten/Tag	<b>62.53 sFr</b>

*Machbarkeit technisch und betrieblich:*

Diese Variante ist technisch machbar (siehe Lyon Bus, Manzoni, IAMF 2008<sup>1</sup>). Auch der Unterhalt und der Aufwand für den Batteriewechsel sind klein. Hauptproblem sind hier die Kosten. Falls einmal, wie dies schon vor Jahren prognostiziert wurde, ein Preis von 200 €/kWh erreicht und die Zyklenlebensdauer >1500 sein wird, würden sich die Speicherkosten pro Tag immer noch auf ca. 16 sFr belaufen, was immer noch ein Vielfaches der SCAP Lösung ist.

---

<sup>1</sup> Giorgio Mantovani, Fabio Nicora, Renato Manzoni: Pure electric buses fleet in Lyon: mission, battery, energy, maintenance; IAMF 2008, Genf

### 3.4.4.2 ZEBRA Batterie mit einmaliger Tagesnachladung

Für diesen Fall wird das Gewicht der ZEBRA Batterie soweit reduziert, dass die Leistung der Batterie genügt, um ab Batterie die erforderliche Spitzenleistung des Busses zu gewährleisten. Dafür muss aber einmal nachgeladen werden. Durch die geringere Leistungsdichte der ZEBRA Batterie gegenüber den SCAPs sind hier immer noch 400kg Speicher nötig.

*TR-Bus mit ZEBRA Batterie von 400kg für den Tagesbedarf bei einer einmaligen Nachladung:*

#### *Technische Daten:*

Gewicht Fahrzeug komplett, inkl. 11 Personen	4.881 t
Spezifische Energiedichte ZEBRA	110 Wh/kg
Energie ZEBRA Batterie (bei Nutzung von 90% DOD)	39'600 Wh
Gewicht ZEBRA Batterie	400 kg
Reichweite/Ladung	95.4 km

#### *Wirtschaftlichkeit:*

Es ist eine Nachladung pro Tag nötig für (1.65 Voll-Zyklen pro Tag, d.h. 1 mal pro Tag mit 30kW ca. 1 Stunde schnell laden)	157.2 km
Lebensdauer ZEBRA Batterien	1'000 Zyklen
Ergibt eine Lebensdauer von	<b>607</b> Tage
Annahme Kosten:	800 sFr/kWh
(dies ist ein aktueller Preis für ZEBRA Batterien)	
Speicherkosten inkl. 1000.- Batteriewechsel alle 607 Tage	35'200 sFr
Speicherkosten/Tag	<b>59.64 sFr</b>

#### *Machbarkeit technisch und betrieblich:*

Diese Variante ist technisch machbar. Die Grenze für die Dimensionierung ist die Leistungsdichte der ZEBRA Batterie. Die Kosten sind leicht tiefer als bei der Lösung ohne Nachladung (Kap. 3.4.4.1), weil weniger Gewicht mitgenommen werden muss. Allerdings erhöhen sich die Verluste durch den höheren Innenwiderstand  $R_i$  der kleineren Batterie. Die einmalige Nachladung pro Tag per Schnellladung ist möglich, z.B. mit 30kWh in einer Stunde. Dies führt aber zu Einschränkungen in der Einsatzplanung. Eventuell wäre mit mehrfachem Nachladen pro Tag einfacher zu planen. Es müsste in diesem Fall nicht zwangsläufig über IPT geladen werden, weil die Ladezeit relativ lang ist, was geringere Investitionen bezüglich der Infrastruktur bedeutet. Die Speicherkosten liegen viel höher als bei den Supercaps.

### 3.4.5 Analyse der Ergebnisse

#### 3.4.5.1 Zusammenstellung der wichtigsten Daten

Die im Kapitel 3.4.1 bis 3.4.4 ermittelten Ergebnisse lassen sich wie folgt darstellen (Tabelle 1):

Variante	Fzg. Masse [kg]	Energiespeicher Wechsel [Tage]	Energiekosten pro Tag [sFr]	Bemerkungen
Supercaps (3.4.2)	5025	16'667, 45.7 J (theoretisch)	1.66 bis 7.5	≈ Endlos, begrenzt durch Kalenderlebensdauer ≈ 10 Jahre, deshalb 2. Kostenwert
Blei, Tagesbedarf (3.4.3.1)	10109	300	85.63	Gewicht unrealistisch
Blei, Gewicht wie SCAPs (3.4.3.2)	5025	58	48.14	Zu häufiger Batteriewechsel, 25min Fahrpausen
Blei, viel nachladen (3.4.3.3)	4654	20	56.86	Wechsel Batterien betrieblich völlig unrealistisch
ZEBRA, Tagesbedarf (3.4.4.1)	5180	1000	62.53	Gut, nur Kosten sind viel zu hoch
ZEBRA, 1x Nachladung (3.4.4.2)	4881	1000	59.64	Machbar, aber gegenüber 3.4.4.1 nur unwesentlich günstiger

**Tabelle 1:** Übersicht der wichtigsten Aussagen verschiedener Energiespeicher

#### 3.4.5.2 Neue Möglichkeiten mit SCAPs und Lithium-Ionen Batterien

##### Neue Generation SCAPs

Die Weiterentwicklung bei den SCAPs geht schnell voran. Schon der Einsatz der aktuell erhältlichen BCAP3000 mit höherer Spannung und grösserer Energiedichte anstelle der im TR-Bus eingesetzten BCAP1800 würden Verbesserungen bringen. Angenommen seien die gleichen Voraussetzungen, also eine Energie von **1500Wh** und eine gleich grosse Masse für das Packaging und die Umrichter, also ca. 160 kg. Die Gegenüberstellung zeigt Tabelle 2.

	<b>BCAP0008, 1800F</b>	<b>BCAP3000, 3000F</b>
Anzahl SCAPs	960	494
Gewicht SCAPs	384	272
Gewicht Speicher komplett, mit Umrichtern	544	432

**Tabelle 2:** TR-Bus Supercaps und Nachfolger im Vergleich

Diese Umrüstung auf die neuste SCAP Technologie würde bei gleichem Energieinhalt eine Gewichtseinsparung von 112 kg, also mehr als 20% bedeuten. Die Reduktion der Anzahl SCAPs auf fast die Hälfte bringt durch die Reduktion der Anzahl Verbindungen und Beschaltungen eine zusätzliche Erhöhung der Zuverlässigkeit des gesamten Systems. Weitere Verbesserungen in nächster Zukunft sind abzusehen.

Als Ausblick sei folgende Bemerkung festgehalten. Das Einsatzprinzip des TR-Busses sähe vor, an jeder Station nachzuladen und deshalb nur für kürzere Distanzen Supercaps mitzunehmen. Damit ergäbe sich eine zusätzliche Gewichtsreduktion!

## Neue Möglichkeiten mit Li-Ionen Batterien

Die Entwicklungen im Bereich der Lithium-Ionen Zellen geht ebenfalls rasant voran. Wenn man bedenkt, dass das erste kommerziell erhältliche Produkt, ein Camcorder von Sony, erst 1992, d.h. vor 16 Jahren auf den Markt kam und heute Millionen von Lithium-Ionen Zellen in Handys, Laptops, MP3-Playern, Digicams, Akku-Handwerkmaschinen bis hin zu Elektrovelos verbaut werden, ist noch nicht abzusehen, wo wir in ein paar Jahren stehen werden.

Die nachfolgenden Beispiele wurden mit Zellen von "Johnson Control Saft" simuliert. Von der Firma "Altair Nano" oder von Toshiba mit der SCiB Technologie sind auch "Very High Power" Zellen auf dem Markt.

Die Preise sind aber im Moment noch sehr schwierig anzugeben. Sie reichen von etwa 400 sFr/kWh für günstige chinesische Zellen bis zu mehreren 1'000 sFr/kWh für Spezialzellen.

Die Beispiele wurden mit den gleichen Annahmen wie in den vorhergehenden Abschnitten durchgerechnet:

### *TR-Bus mit Li-Ionen Zellen sehr hoher Leistung:*

#### *Technische Daten:*

Gewicht Fahrzeug komplett	4.583 t
spez. Energiedichte	74 Wh/kg
Energie Batterie (100% DOD)	7'578 Wh
Gewicht 160 Zellen SAFT VL12V (very high power cell) <sup>2</sup>	<b>102 kg</b>
Reichweite/Ladung	19.5 km

#### *Wirtschaftlichkeit:*

Es sind 8 Volladungen pro Tag nötig für (60 mal 15% Teilladungen mit 30kW mit IPT)	157.2 km
Lebensdauer VL12V Batterien (20% SOC Entladungen, geschätzt)	5'000 Zyklen
Ergibt eine Lebensdauer von	<b>619 Tage</b>
Annahme Kosten:	5'000 sFr/kWh (geschätzt)
Speicherkosten inkl. Batteriewechsel alle 619 Tage	42'598 sFr
Speicherkosten/Tag	<b>68.86 sFr</b>

#### *Machbarkeit technisch und betrieblich:*

Ausgangspunkt für diese Betrachtungen sind das Abwägen der Anzahl Nachladungen in Bezug auf die Leistung der Batterien. Durch iteratives Suchen lässt sich eine Lösung mit 8 Nachladungen als geeignet finden.

Diese Variante ist technisch machbar. Frappant ist das geringe Gewicht der Batterie von nur 102kg. Die Hauptprobleme sind die Verfügbarkeit und der Preis der Batterie, da diese momentan praktisch ausschliesslich im militärischen Bereich Anwendung findet. Diese Batterien stellen eine gute Option dar, wenn weniger IPT Ladestellen benötigt werden sollen. Weil nur 8 mal pro Tag geladen werden muss, könnte man statt IPT eine kostengünstigere Lösung mit einer kabelbasierten Ladestation von ca. 30kW planen.

Die Wirtschaftlichkeit hängt wesentlich von der Lebensdauer ab. Bei 3% "shallow cycles" (Teilladungen) werden 500'000 "Zyklen" angegeben. Dies entspricht 16'000 Voll-Zyklen. Sinkt der kWh-Preis aus obiger Berechnung auf etwa die Hälfte und steigt die Lebensdauer auf 20'000 Zyklen, so sinken die Speicherkosten pro Tag von sFr 68.86 auf sFr 8.61, d.h. auf ca. 12% der heute geschätzten Kosten! Momentan liegen die Speicherkosten aber immer noch viel höher als bei den Supercaps. Die rasante Entwicklung auf dem Gebiet der optimierten Li-Ionen Batterien kann mittelfristig zu ganz neuen Lösungen führen, die SCAPs teilweise sogar konkurrenzieren können. Diese Entwicklung wird vom CC IIEE deshalb genau mitverfolgt.

---

<sup>2</sup> <http://www.saftbatteries.com/doc/Documents/defence/Cube769/VL12V%20Data%20Sheet.c7de671e-cdc6-46aa-9a9e-993b776e3c6f.pdf>

*TR-Bus mit Li-Ionen Zellen sehr hoher Energiedichte, ausgelegt zur Abdeckung des Tagesbedarfs*

**Technische Daten:**

Gewicht Fahrzeug komplett	4.930 t
420 Zellen SAFT VL 41E (high energy cell) <sup>3</sup>	449 kg
Spezifische Energiedichte Batterie	149 Wh/kg
Energie Batterie (100% DOD)	66'961 Wh
Reichweite/Ladung	159.8 km

**Wirtschaftlichkeit:**

Es ist nur eine Volladungen pro Tag nötig für	157.2 km
Lebensdauer VL41E Batterien (100% DOD Entladungen)	2'000 Zyklen
Ergibt eine Lebensdauer von	<b>2'000 Tage</b>
Annahme Kosten: Li-Ion very high energy (dieser Preis ist geschätzt)	1'000 sFr/kWh
Speicherkosten inkl. Batteriewechsel alle 2000 Tage	74'901 sFr
Speicherkosten/Tag	<b>37.45 sFr</b>

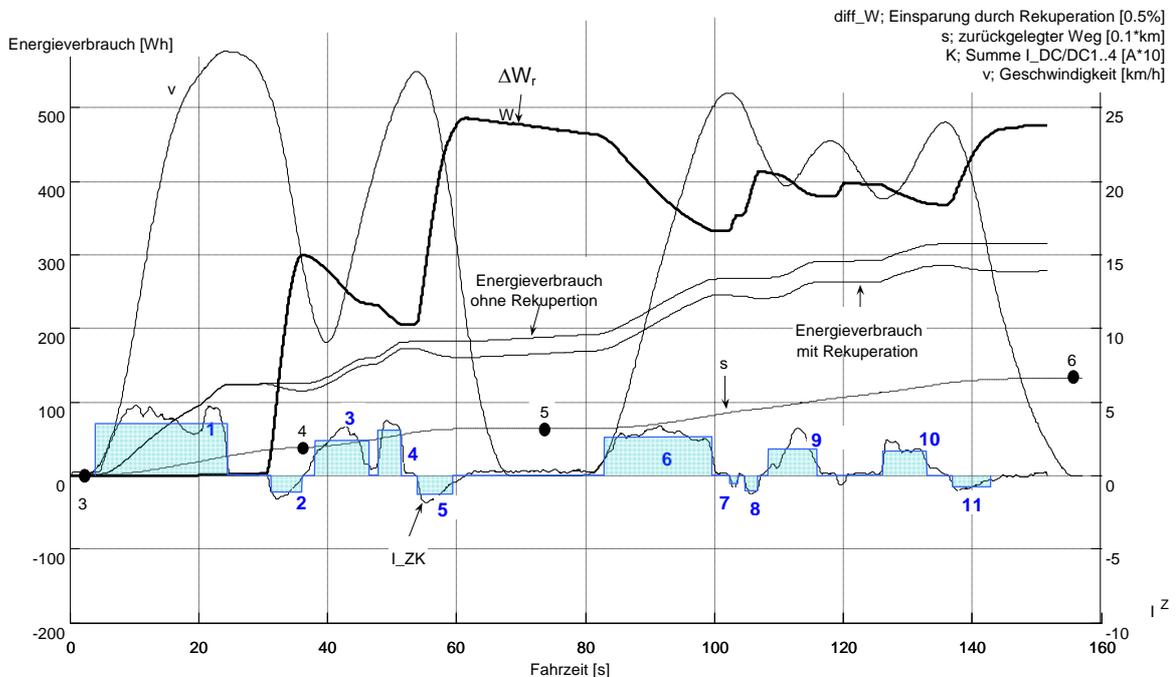
**Machbarkeit technisch und betrieblich:**

Diese Variante ist technisch machbar. Hauptaspekte für die Wirtschaftlichkeit sind die Lebensdauer und die Preise der Batterie, da sich die verschiedenen Li-Ionen Typen noch sehr stark in der Weiterentwicklung befinden. Die Speicherkosten liegen aber viel höher als bei den Supercaps.

**3.4.5.3 Effizienz- und Verlustbetrachtungen**

Die Ausführungen im vorangehenden Kapitel berücksichtigen die Verluste noch nicht. Die guten Resultate bei den Messfahrten mit den Supercaps beruhen aber wesentlich auf ihren kleinen Verlusten. Der Wirkungsgrad ist entsprechend hoch und liegt je nach Auslegung deutlich über 90%. Dies bedeutet einem kompletten Lade- und Entladezyklus gesamthaft einen Wirkungsgrad, der besser als 85-90% sein kann. Demgegenüber wurden bei den Vergleichen mit den Batterien der viel schlechtere Wirkungsgrad und der Peukert Effekt gar noch nicht mitbetrachtet.

Um einen Eindruck über die Verhältnisse zu bekommen untersuchten wir den Einfluss des Innenwiderstandes auf den Energiebedarf des Busses im Abschnitt Hofkirche – Hauptbahnhof Luzern wieder mit der gleichen Messfahrt wie in Abbildung 9 und beobachten den Zwischenkreisstrom (Fig. 11).



**Figur 11:** Fahrabschnitt von der Hofkirche bis zum Bahnhof Luzern mit angenähertem Verlauf des Fahrstromes durch eine Reihe von Rechteck Kurven

<sup>3</sup> <http://www.saftbatteries.com>

Zur Abschätzung der Verluste durch den Innenwiderstand  $R_i$  gehen wir im Übrigen von den Eckdaten in Kap. 3.4.1 aus. Die Verluste am Innenwiderstand sind wie folgt gegeben:

$$E_{R_i} = \int_{t_{HK}}^{t_{BL}} R_i \cdot i^2 dt \text{ mit } \begin{cases} E_{R_i} = \text{Verlustenergie durch Innenwiderstand } R_i \\ t_{BL} - t_{HK} = \text{Fahrzeit, BH: Bahnhof Luzern, HK: Hofkirche} \\ i = \text{SCAP bzw. Batterienstrom} \end{cases}$$

Der Zwischenkreisstrom wird in Fig. 11 in 11 Teilpaketen angenähert. Da es um eine grobe Vergleichsbetrachtung von Supercaps gegenüber Batterien geht, verzichten wir einfachheitshalber auf die korrekte quadratische Mittelung des Stromes. Die Strom-Zeitfläche ist jeweils eingefärbt zu erkennen und führt zu den 11 Wertepaaren in Tabelle 3.

Für die Supercaps gilt:

Der Innenwiderstand des BCAP0008 beträgt gemäss Datenblatt  $R_{iSC} = 0.9m\Omega$ . In den 4 parallelen SAMs mit je 240 SCAPs in Serie sind total 960 SCAPs untergebracht. Da es sich um den Schlussteil der Fahrt handelt, werden die SCAPs nicht mehr voll sein. Wir nehmen einen mittleren Ladezustand der SCAPs mit einer Klemmenspannung eines einzelnen SCAPs von 2.0V statt 2.5V wie beim vollen Ladezustand an. Die tiefere Spannung verlangt bei der gleichen Leistung höhere Ströme im umgekehrten Verhältnis zum Spannungsniveau, da die Leistung  $P = U \cdot I$  konstant sein muss.

Zudem ist wegen der vier parallelen SAM Modulen von einem Viertel des Zwischenkreisstromes auszugehen. Damit ergibt sich zur Berechnung des Verlustes eines SCAPs aus der Zwischenkreisspannung:

$$W_{SC} = \left( \frac{I_{ZKn}}{4} \frac{U_{SC0}}{U_{SCn}} \right)^2 \cdot R_i \cdot T_n$$

Das ergibt folgende Zusammenstellung gemäss Tabelle 3:

$R_i = 0.9m\Omega$	$n \Rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$I_{ZKn}$	[A]	36.0	-11.0	24.0	31.0	-13.0	26.0	-6.0	-10.0	19.0	17.0	-8.0
$T_n$	[s]	20.3	4.8	8.3	3.5	5.5	16.5	1.3	2.0	7.5	6.8	5.8
$W_{sc} =$	[Ws]	<b>2.31</b>	<b>0.05</b>	<b>0.42</b>	<b>0.30</b>	<b>0.08</b>	<b>0.98</b>	<b>0.00</b>	<b>0.02</b>	<b>0.24</b>	<b>0.17</b>	<b>0.03</b>
$W_{Tot} = 960 W_{sc}$	[Wh]	<b>= 1.2Wh</b>										

**Tabelle 3:** Berechnung der SCAP Verluste

Der durch die Speicherverluste bewirkte Anteil am spezifischen Energiewert für dieses Teilstück von 96.8Wh/t·km beträgt damit nur  $\frac{1.2Wh}{4.35t \cdot 0.66km} = 0.42Wh / t \cdot km$ , also **nur ca. 0.4%** !

Der Vergleich mit Bleibatterien:

Die nachfolgenden Betrachtungen erheben nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, sie dienen lediglich der Veranschaulichung der Problematik.

Der Berechnung liegt der Bleiakku Modell **D34/75** von „Optima Batteries“ mit folgenden Daten zu Grunde<sup>4</sup>:

- Energie: 50Ah (C/20), 12V, 17.6kg
- Energieinhalt einer Batterie: 600Wh
- Bei gleicher Masse wie Supercaps (vgl. Kapitel 3.4.3.2: 544kg) ergäben sich für diesen Batterietyp 31 Batterien und eine Klemmenspannung von 372V.
- Dabei beträgt der gesamte Innenwiderstand 31 mal 3.0mΩ also 93mΩ, da alle Batterien in Serie geschaltet sind. Dieser Innenwiderstand gilt nur für den voll geladenen Zustand. Weil auch bei den SCAPs nicht der voll geladene Zustand genommen wird, wird hier ein Zuschlag von 30% vorgenommen, was  $R_i = 121\text{m}\Omega$  ergibt. Ähnlich wie bei den SCAPs muss der Zwischenkreisstrom auf die tiefere Spannungsebene (372V) zurückgerechnet werden, was zu der für die Batterien angepassten, nachfolgenden Formel führt:

$$W_B = \left( I_{ZKn} \frac{U_{ZK}}{U_B} \right)^2 \cdot R_i \cdot T_n$$

$\left\{ \begin{array}{l} W_B \\ I_{ZKn} \\ U_{ZK} \\ U_B \\ R_i \\ T_n \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{Verlust aller 31 Batterien} \\ \text{gemittelter Zwischenkreisstrom} \\ \text{Zwischenkreisspannung 600V} \\ \text{aktuelle Spannung Batteriezelle, für alle 1.38V} \\ \text{gesamter Innenwiderstand} \\ \text{Länge in [s] eines Teilpakets} \end{array}$

Das ergibt folgende Zusammenstellung in Tabelle 4:

$R_i=121.0\text{m}\Omega$	$n \Rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$I_{ZKn}$	[A]	36.0	-11.0	24.0	31.0	-13.0	26.0	-6.0	-10.0	19.0	17.0	-8.0
$T_n$	[s]	20.3	4.8	8.3	3.5	5.5	16.5	1.3	2.0	7.5	6.8	5.8
$W_B =$	[Ws]	<b>8281</b>	<b>183</b>	<b>1505</b>	<b>1059</b>	<b>293</b>	<b>3511</b>	<b>15</b>	<b>63</b>	<b>852</b>	<b>619</b>	<b>117</b>
$W_{Tot} =$	[Wh]	<b>= 4.6Wh</b>										

**Tabelle 4:** Berechnung der Batterieverluste

Der durch die Speicherverluste bewirkte Anteil am spezifischen Energiewert für dieses Teilstück von 96.8Wh/t·km beträgt damit nur  $\frac{4.6\text{Wh}}{4.35\text{t} \cdot 0.66\text{km}} = 1.6\text{Wh} / \text{t} \cdot \text{km}$ , also **1.7%** !

Die Verluste sind also bei den Batterien rund vier mal so hoch!

<sup>4</sup> <http://www.optimabatteries.com>

Die beiden Resultate lassen sich wie folgt kommentieren:

- Beide Resultate fallen im spezifischen Energiewert für diesen speziellen Ausschnitt nicht gross ins Gewicht.
- SCAPs zeigen bedeutend kleinere Verluste als Batterien.
- Für diese Betrachtung ist der Ladezustand zentral: je nach Ladezustand der SCAPs sind die transformierten Ströme grösser oder kleiner, was wegen der Quadrierung stark ins Gewicht fällt. Sind die SCAPs voll geladen wird der Unterschied zu Gunsten der SCAPs noch deutlich höher (ca. Faktor 6). Umgekehrt gilt es allerdings festzuhalten, dass bei sehr stark entladenen SCAPs diese nur noch ca. 1.5 mal besser als Batterien sind.
- Daraus ergibt sich, dass durch die geschickte Dimensionierung des SCAP-Energiespeichers (keine zu tiefen Ladezustände) die Verluste gegenüber den Kosten und der Masse optimiert werden müssen.
- Die Situation der Batterien verschlechtert sich allerdings dadurch, dass deren Innenwiderstand stark vom Ladezustand und der Alterung, bedingt durch den stark zyklischen Betrieb, abhängt.
- Vergleich mit der ZEBRA Batterie:

Der Innenwiderstand der ZEBRA Batterie ist um Faktoren höher als derjenige der Bleibatterie. Dies führt zu erheblichen zusätzlichen Verlusten, selbst wenn eine Batterie nach Kapitel 3.4.4.1 für den Tageseinsatz dimensioniert wird.

Die thermischen Verluste, die für die ZEBRA Batterie spezifisch sind, werden allerdings durch die Verluste durch den grossen Innenwiderstand teilweise kompensiert, weil sie einen Beitrag zur Temperaturkonstanthaltung leisten.

Im Vergleich zu den Rekuperationsverlusten sind die thermischen Verluste viel höher, so dass ein Vergleich mit den SCAPs nicht sinnvoll erscheint.

#### 3.4.5.4 Allgemeine Diskussion der Ergebnisse, Zusammenfassung

- SCAPs zeigen gegenüber Batterien Vorteile bezüglich dem Einsatzkonzept, den Verlusten, der Lebensdauer und der Wartung und sie machen bei harten "Stop & Go" Profilen Sinn. Dies gilt grundsätzlich bei allen Anwendungen, wo die Energiedichte nicht ausschlaggebend ist und nur die hohe Leistungsdichte, wie bei den kurzen Ladeintervallen mit IPT oder bei der Spitzenabdeckung bei Diesel-, Erdgas-, Hybrid- oder Elektro-Bussen, zählt. Hier haben SCAPs sowohl erhebliche Kosten-, aber auch Effizienz-Vorteile.
- Der TOHYCO-Rider Bus verfügt über eine "Autonomie"-Batterie (ZEBRA), um sich in einem begrenzten Radius auch unabhängig von den IPT Ladeinseln bewegen zu können. Durch das Regelungsverfahren kommt diese aber nur bei vollständiger Entladung der Supercaps zum Einsatz. Die Masse dieser Batterie wurde, obwohl die Batterie keinen Traktionsbeitrag liefert, immer in die Berechnungen miteinbezogen. Würde diese Masse weggelassen oder mindestens reduziert werden, ergäben sich noch bessere Resultate für den TR-Bus.
- Kurzfristig sind Anwendungen mit SCAPs sinnvoll bei:
  1. Stadtbus mit kurzzeitigen Ladezyklen und einem Ladestationen-Netz, als Alternative zu Trolleybussen und mit Verbrennungsmotor angetriebenen Bussen.
  2. Hybrid Lösungen Diesel/Erdgas-elektrisch mit Supercaps für Stadt-Bus-Routen, die einen hohen "Stop & Go" Anteil aufweisen.
- Die Versuchsfahrten mit dem TOHYCO-Rider Bus zeigen deutlich, dass die Supercap-Technik schon heute die Realisierung von elektrogetriebenen Fahrzeugen in Stadt und Überland ohne Fahrleitungen (Hybridfahrzeuge) erlaubt. Bei grösseren Bussen, wie etwa der 24m Doppelgelenk-Hybridbus "LighTram" der Firmen HESS/Vossloh-Kiepe wird der Einsatz wegen der grösseren Energieumsätze noch günstiger.
- Mittelfristig ist für den Stadtbetrieb eine Lösung analog zum TOHYCO-Rider Bus ideal. Für Überlandbusse könnten langfristig Hybridlösungen mit Supercaps und Brennstoffzellen an Stelle von Verbrennungsmotoren interessant werden.
- Sowohl auf dem Gebiet der Weiterentwicklung der SCAPs, als auch bei Batterien, sind in den letzten Jahren gewaltige Fortschritte erzielt worden. Die Neuentwicklungen bei Lithium-Ionen Batterien lassen den Vorteil bezüglich Effizienz und Leistungsdichte von SCAPs immer kleiner werden. Die Preisentwicklung der neuen Lithium Technologien wird entscheidend dafür sein, auf welchen Gebieten diese die SCAPs real konkurrenzieren können. Dieser Trend wird auch in nächster Zukunft anhalten. Die optimale Auslegung eines Energiespeichers mit Supercaps und oder Batterien wird deshalb in Zukunft weiterhin genau beobachtet werden müssen.
- Ebenfalls langfristig könnten ganz neue Technologien wie etwa die Nanotechnik noch bessere Speicher ermöglichen.
- Ein grundsätzliches Problem muss bei der Elektromobilität immer im Auge behalten werden: Bei den elektrogetriebene Fahrzeugen stellt sich allgemein immer die Frage der Bereitstellung der elektrischen Energie, sei es durch Speicherung oder durch Produktion "On Board" (Hybrid). Für die Energiespeicherung muss immer noch ein relativ grosses Gewicht an Batterien mitgeführt werden, und die Energieerzeugung kann in stationären Anlagen umweltfreundlicher und effizienter erzeugt werden als auf den Fahrzeugen selbst, was eigentlich langfristig gegen die Hybridtechnologie spricht. Das Einsatzkonzept des TOHYCO-Rider Bus mit häufigem Nachladen und minimalem Energiespeichergewicht bietet sich hier als Lösung an.

### 3.5 ENERGETISCHE AUSWERTUNGEN DES VHS-BETRIEB 2006

#### 3.5.1 Einleitung

Grundlage dieser Auswertungen sind die Aufzeichnungen des im Bus integrierten Historienspeichers, der während des ganzen Betriebs den Datenverkehr auf dem Fahrzeugbus aufzeichnete.

Im Gegensatz zu den Daten aus den Messfahrten im März 2006 waren die Datenmengen pro Aufzeichnung einzelner Fahrten zwar kürzer und bildeten weniger harte Zyklen ab, dafür konnten insgesamt aber 364 komplette und immer ähnliche Fahrten rund um das VHS aufgezeichnet und statistisch ausgewertet werden.

Diese statistischen Auswertungen erlaubten eine breiter abgestützte Energiebilanzierung des TR-Busses, die nachfolgend zusammenfassend beschrieben wird.

##### 3.5.1.1 Mit dem Historienspeicher aufgezeichnete Werte

Mit dem Historienspeicher wurden folgende Werte **einmal pro Sekunde** aufgezeichnet:

- Ströme in, bzw. aus den SAM-Speichern I\_SAM1 bis I\_SAM4 als Mittelwerte pro Sekunde
- Spannungen der SAM-Speicher U\_SAM1..4 als Mittelwerte pro Sekunde
- Zwischenkreisstrom I\_ZK als Mittelwert pro Sekunde
- Zwischenkreisspannung U\_ZK als Mittelwert pro Sekunde
- Drehzahl des Motors und daraus berechnet, die Geschwindigkeit als Mittelwert pro Sekunde
- 16 Zustandsbits: Regelfreigaben an die DC-Wandler 1 bis 4, den ZEBRA-Wandler und den Antriebs-Frequenzumrichter, Zündschlüsselstellungen, Bremsbetätigung, Fahrtrichtungsschalter („Vor“ und „Zurück“), die Stellung des Betriebswahlschalters („IPT“ und „Drive“) und des Betriebsmodusschalters („Auto“ bzw. "Manuell"). Die Zustandsbits wurden einmal pro Sekunde abgetastet.

Für eine bessere Fehler-Nachverfolgbarkeit wurden für einen späteren Teil der Messungen die Datensätze zusätzlich ergänzt mit:

- IPT-Ladestrom I\_IPT als Mittelwert pro Sekunde
- ZEBRA-Spannung U\_ZEB als Mittelwert pro Sekunde
- Ein Zustandsbit zur Überwachung eventueller ZEBRA-Fehler

Die Daten lagen, nach Verarbeitung durch ein Konvertierungsprogramm, auf dem PC im csv-Tabellenformat ("Comma Separated Values") vor und liessen sich somit einfach mit Excel bearbeiten.

##### 3.5.1.2 Zur Qualität der Messdaten

Die vom Historienspeicher gelieferten Messdaten sind vom bordeigenen CAN-Datenbus ausgelesene digitale Werte mit einer 8-Bit Genauigkeit. Für die Energieauswertungen ist diese Genauigkeit genügend, aber geringer als bei den Messfahrten im März 2006. Ein Attribut der Historienspeicherdaten ist jedoch deren Quantität: Sie lässt statistisch fundierte Schlüsse auf die grundlegende Funktion und das Verhalten des TR-Busses zu.

### 3.5.2 Vorgehen bei der Auswertung der Aufzeichnungen

Nach Abschluss des VHS-Betriebs lagen 81 Dateien mit Aufzeichnungen über einen ganzen Tag („Tageslogger“) aus dem Historienspeicher mit jeweils über 19'000 Zeilen vor. Zur Aufarbeitung dieser umfangreichen Datensätze wurde ein Programm erstellt, welches eine automatisierte Auswertung zuließ.

Um die Auswertung nur auf die eigentlichen Fahrten zu beschränken, musste das Programm

- die einzelnen Fahrten anhand der immer sehr ähnlichen Geschwindigkeits/Weg-Profile erkennen,
- die Anfangs- und Endindizes der Tagesloggerdaten herausschreiben und
- das Datum der Fahrt mit der laufenden Nummer der Fahrt dieses Tages notieren, um anschliessend wieder auf die betreffende Datei zugreifen zu können und um die Fahrt eindeutig zu identifizieren.

Die eigentliche Auswertung griff anschliessend auf diese Indizes zu, womit 364 komplette Fahrten rund ums Verkehrshaus (VHS) erkannt werden konnten.

### 3.5.3 Prozentualer Rekuperationsgrad pro Fahrt

Die Energieberechnungen werden bezogen auf die Spannungen der Supercap SAM-Module mit folgendem Verfahren durchgeführt.

- Der Energiefluss in bzw. aus den SAMs konnte dank der Werte  $U_{\text{SAM}1..4}$  durch einfache Integration der Spannung nach der Zeit bestimmt werden. Die Abtastungen  $x$  finden alle 1s statt.

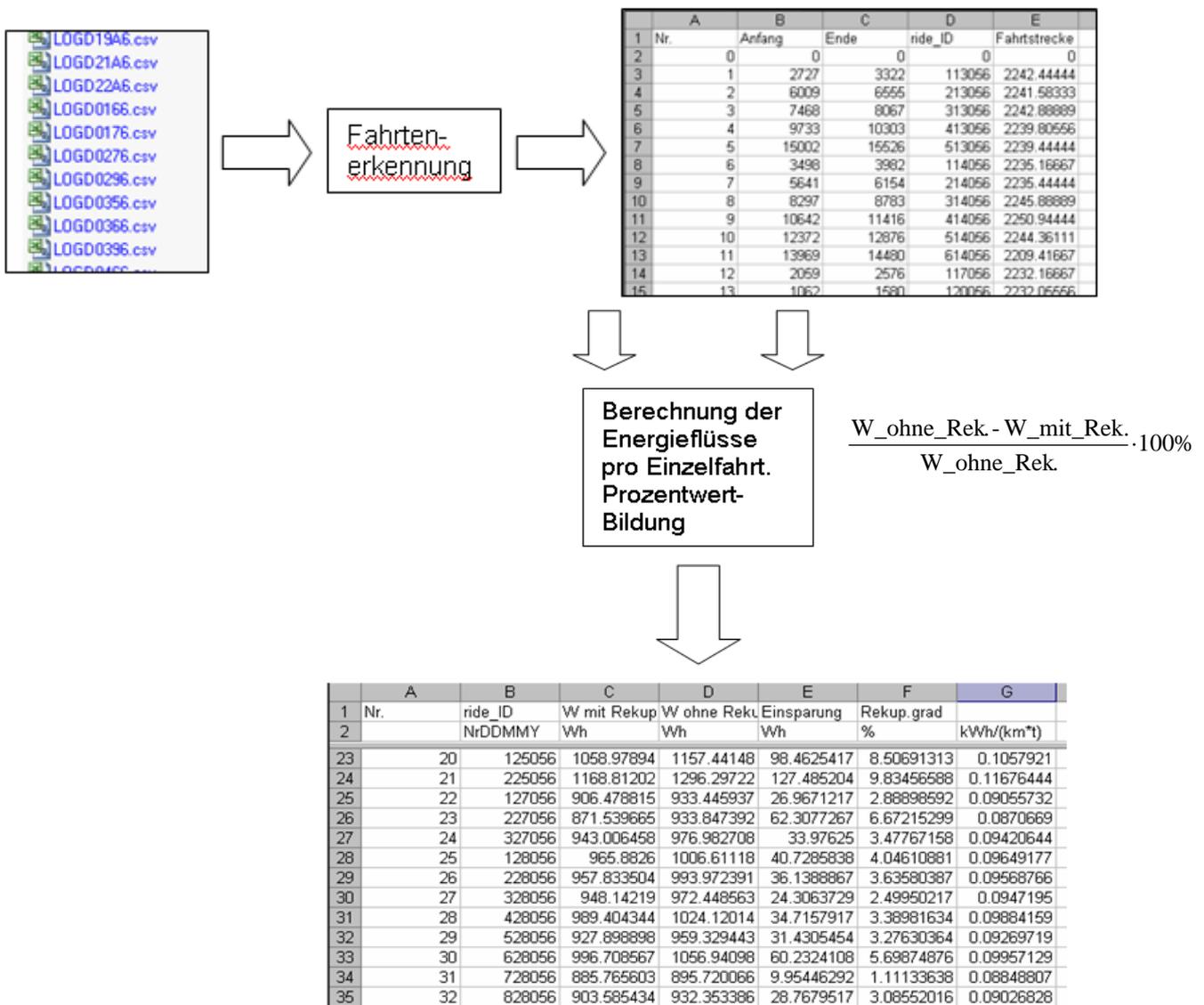
Aktueller Energieinhalt eines Moduls ( $C=7.5F$ ) zum Zeitpunkt  $t$ , Abtastung  $x$ :

$$W_{\text{SAM}x}(t = x) = 0.5 \cdot C \cdot U_{\text{SAM}x}^2(t(x))$$

Aktueller Energieinhalt eines Moduls ( $C=7.5F$ ) zum Zeitpunkt  $t$ , Abtastung  $x+1$ :

$$W_{\text{SAM}x}(t = x + 1) = 0.5 \cdot C \cdot U_{\text{SAM}x}^2(t(x + 1))$$

- Die Differenz der beiden Werte ergibt die Änderung des Energieinhalts während einer Sekunde.
- All diese Differenzen während einer Fahrt aufaddiert ergeben den Energieverbrauch während einer einzelnen Fahrt.
- Wenn ausschliesslich aufaddiert wird, wenn der Energieinhalt abnimmt, ignoriert die Rechnung den Rekuperationsvorgang. ( $W_{\text{ohne\_Rek}}$ )
- Werden alle Differenzen der Energie in die Addition einbezogen (auch wenn die Spannung im Modul zunimmt), wird der Rekuperationseffekt miteinbezogen. ( $W_{\text{mit\_Rek}}$ )
- Der Unterschied der beiden Werte, bezogen auf den gesamten Energieaufwand pro Fahrt, ergibt schlussendlich den prozentualen Rekuperationsgrad pro Fahrt (siehe Fig. 12).



**Figur 12:** Herleitung des prozentualen Reкупationsgrades pro Fahrt aus den erfassten Messreihen

Die Auswertung aller Fahrten ergibt relativ kleine prozentuale Reкупationswerte. Bei 214, oder 58.8%, aller Fahrten liegen die Reкупationswerte über die ganze Fahrt betrachtet zwischen 6 und 9% der aufgewendeten Energie, bei den übrigen noch tiefer. Dies liegt vor allem daran, dass in der betrachteten Betriebsperiode Fahrprofile gefahren wurden, die sanfte Beschleunigungs- und Bremszyklen umfassten, sowie lange Phasen konstanter Geschwindigkeit auftraten.

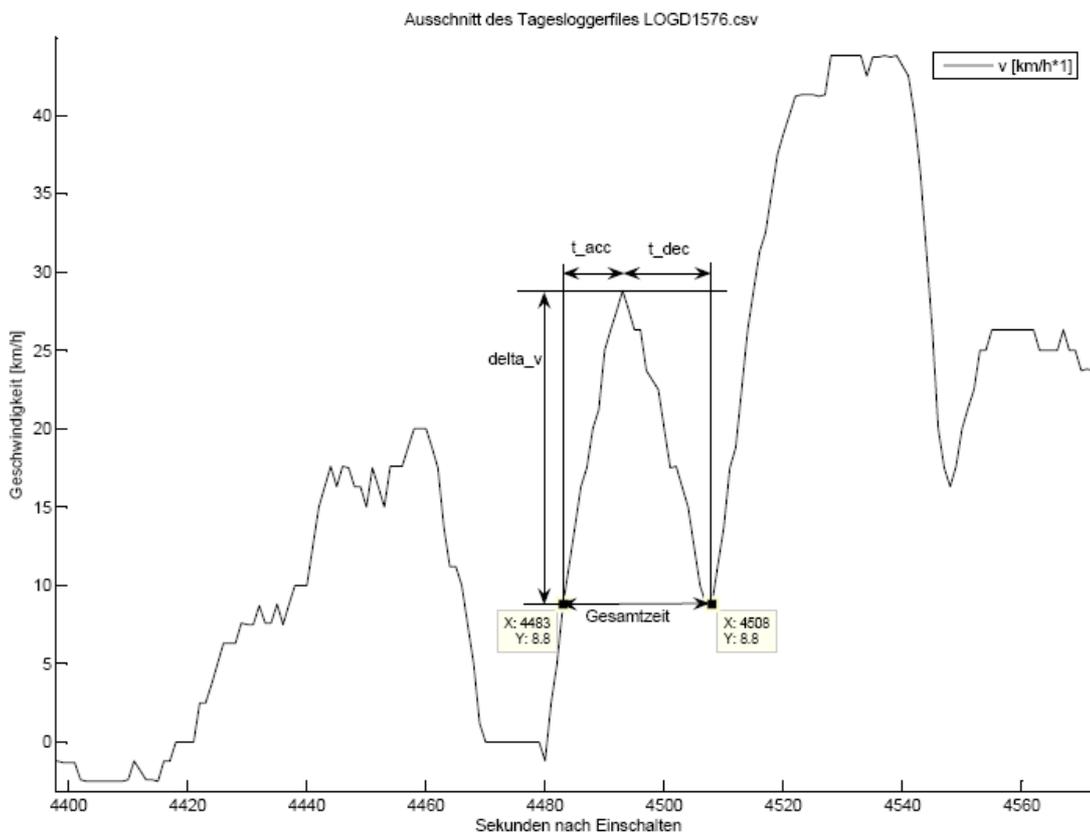
Die Reкупationsfähigkeit ist aber bedeutend höher, wenn ein harter "Stop & Go" Betrieb gefahren wird, oder nur diejenigen Teile einer ganzen Fahrten betrachtet werden, die einen harten "Stop & Go" Betrieb aufweisen.

### 3.5.4 Rekuperationsgrad extrahierter Beschleunigungs- und Bremssteilzyklen

Grundsätzlich war der Einsatz des TR-Busses im Verkehrshaus im Jahr 2006 untypisch, weil nur sehr "weiche" Betriebszyklen gefahren wurden. Werden aber nicht komplette Fahrten, sondern nur einzelne Zyklen von Beschleunigung mit anschliessendem Abbremsen berücksichtigt, zeigen sich dafür auch hier bereits viel höhere Werte. Dies soll ebenfalls das Potenzial der Rekuperation mittels Supercaps unterstreichen.

Um die gesuchten Teilzyklen zu finden, wurde wie folgt vorgegangen.

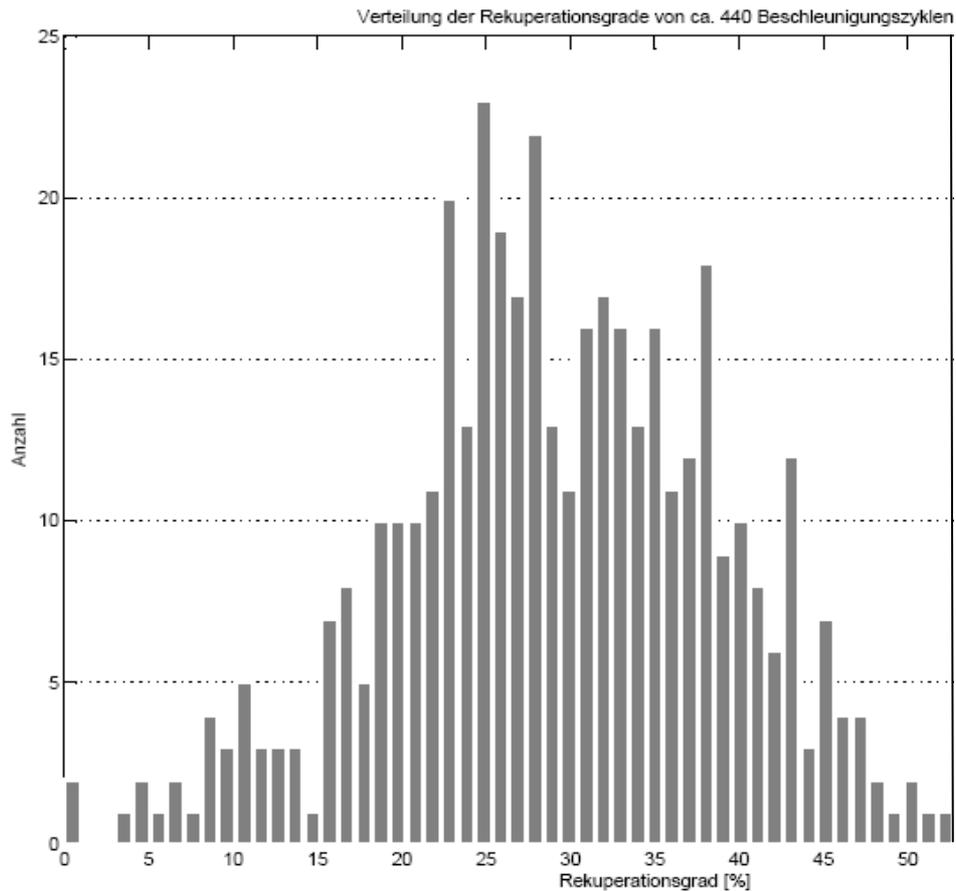
- Als erster Schritt mussten aus allen Geschwindigkeitskurven diejenigen Abschnitte mit hartem "Stop & Go" Betrieb und möglichst kurzem Verharren auf konstanter Geschwindigkeit herausgesucht werden (Beispiel: Fig. 13 mit Beschleunigungszeit „t\_acc“, Bremszeit „t\_dec“ und Geschwindigkeitsveränderung "delta\_v").



**Figur 13:** Herausgefilterter, härterer Teilzyklus mit nur Beschleunigungs- und Bremsphase

- Mit den so gefundenen 440 Teilprofilen wurden ebenfalls die prozentualen Rekuperationsgrade bestimmt. Dabei wurden auch die erreichte Höchstgeschwindigkeit, die Zykluszeit und die „Höhe“ des Geschwindigkeitsbuckels (delta\_v) ermittelt.

In Fig. 14 ist die Verteilung der Rekuperationsgrade der gefundenen Zyklen dargestellt.

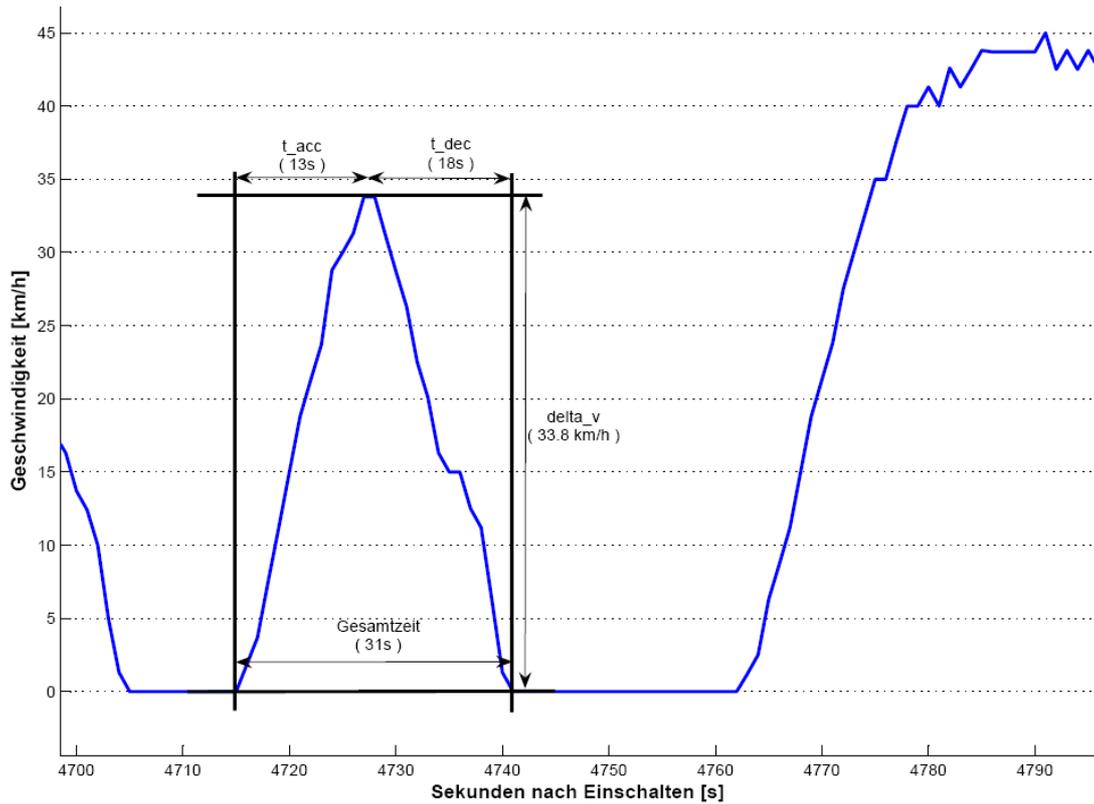


**Figur 14:** Verteilung der Rekuperationsgrade von ca. 440 Beschleunigungs-/Bremszyklen

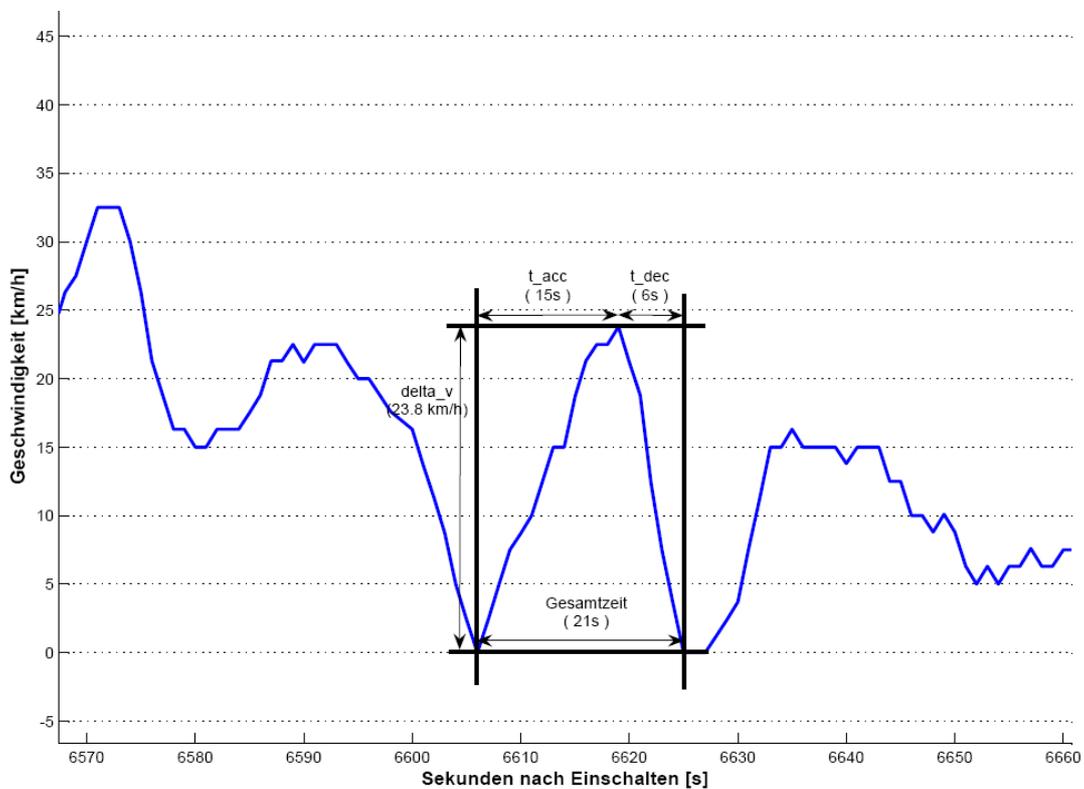
Die Mehrheit der Werte des so ermittelten Rekuperationsgrads bewegt sich zwischen 15% und 45%. Das grosse Mittelfeld findet sich bei erfreulichen Werten von zwischen 18 und 40%, was unterstreicht, dass vor allem bei harten "Stop & Go" Einsätzen die Energiegewinne dank den Supercaps sehr gross sind.

Drei exemplarische Rekuperationsgrade von 10%, 31% bzw. 49% seien nachfolgend noch im Detail erläutert:

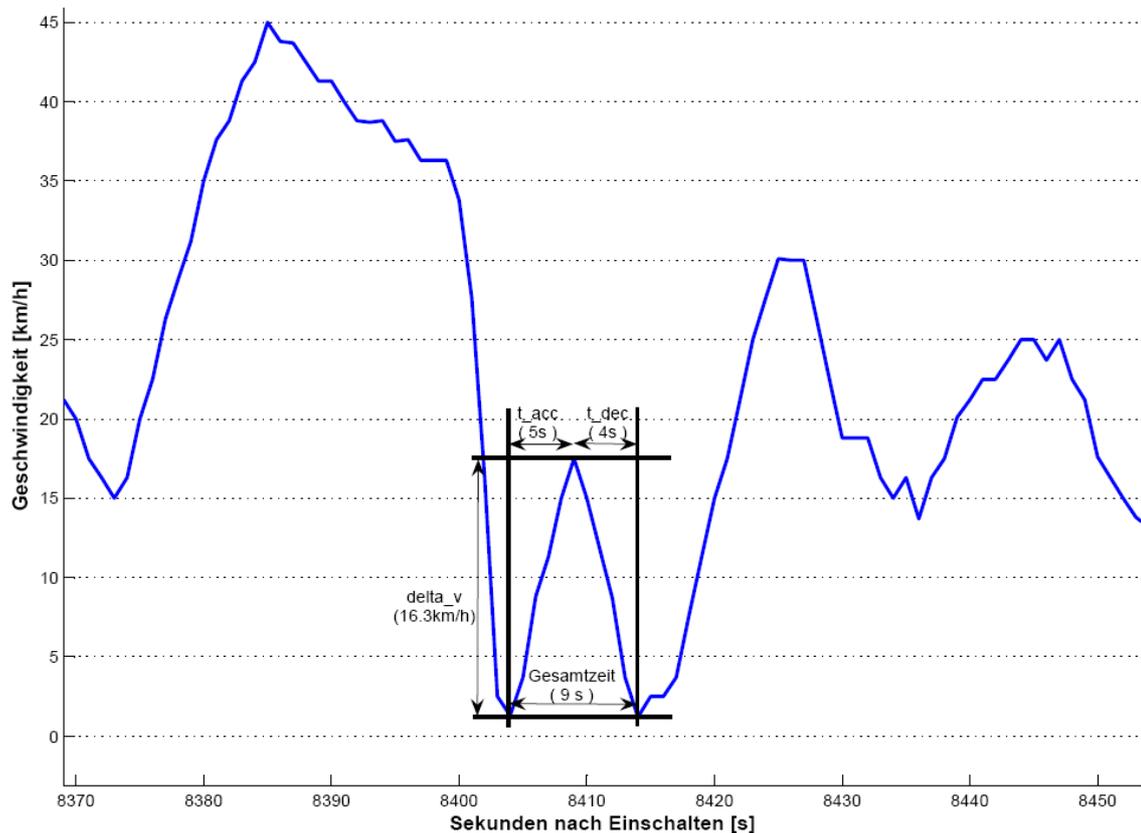
- 10% (Fig. 15):
  - Lange Zykluszeit (31s) mit langer Abbremszeit  $t_{dec}$  (18s)
  - Hohe Geschwindigkeitsdifferenz (33.8km/h)
- 31% (Fig. 16):
  - Tiefere Zykluszeit (21s) mit kurzer Abbremszeit  $t_{dec}$  (6s)
  - Mittlere Geschwindigkeitsdifferenz (23.8km/h)
- 49% (Fig. 17):
  - Tiefste Zykluszeit (9s) mit kurzer Abbremszeit  $t_{dec}$  (4s)
  - Tiefe Geschwindigkeitsdifferenz (16.3km/h)



**Figur 15:** Ein Beschleunigung- / Bremszyklus mit 10% Rekuperationsgrad



**Figur 16:** Ein Beschleunigung- / Bremszyklus mit 31% Rekuperationsgrad



**Figur 17:** Ein Beschleunigung- / Bremszyklus mit 49% Rekuperationsgrad

Zusammengefasst sind als Fazit folgende Aussagen möglich:

1. Je schneller beschleunigt und gebremst wird und je kürzer die Beharrungsfahrt ist, desto grösser werden die Rekuperationsgrade.
2. Hohe Rekuperationsgrade sind nur bei sehr gutem Wirkungsgrad, wie sie die Supercaps ermöglichen, erreichbar. Da die Leistungen bei schnellen Geschwindigkeitsänderungen gross sind, fällt der Wirkungsgrad hier besonders ins Gewicht.
3. Beim TR-Bus sind die sehr kleinen Innenwiderstände der Supercaps für die guten Wirkungsgrade von über 90% massgebend.

### 3.5.5 Betriebserfahrungen aus dem VHS-Betrieb 2006

Erstmals war der TR-Bus sechs Monate am Stück unterwegs. Die gesammelten Erfahrungen über Stärken und Schwächen des Systems sind mannigfaltig: So zeigte sich dank der Auswertung der Historienspeicherdateien, dass die 12V-Versorgung noch ein Schwachpunkt ist, den es zu beheben gilt. Die meisten der aufgetretenen Störungen lassen sich auf dieses Problem zurückführen. Speziell zu erwähnen sind zwei defekte DC/DC-Wandler und dreimaliges Stehenbleiben auf der Strecke wegen den Bordnetzproblemen. Während der letzten 1.5 Monate des Betriebs wurde die 12V-Autobatterie jeweils über Nacht nachgeladen. In diesem Zeitraum waren deshalb weder gravierende Störungen noch Ausfälle der Elektrik zu beklagen.

Weitgehend zufriedenstellend verhielten sich die Supercap-Speicher auch bei diesem Einsatz: Kein einziger Ausfall des Fahrzeugs konnte auf die Fehlfunktion eines der SAM-Module zurückgeführt werden. Es zeigte sich allerdings, dass die Steuerelektronik der einzelnen Speichermodule zu wenig gut vor Fehlern der 12V-Batterieversorgung geschützt ist (vgl. auch Ausfälle Kapitel 3.6).

Im Gegensatz zum Pilotbetrieb 2004 waren die Passagierzahlen ansehnlich: Bei typischem „Verkehrshaus-Wetter“ kam es nicht selten vor, dass einzelne Passagiere auf dem Rundkurs ums VHS stehen mussten und die Chauffeure bis zu 15 Fahrten am Tag machten, um der Nachfrage zu genügen. Dafür waren während des heissen Julis 2006 die Besucherfrequenzen eher dürtig.

Die Motivation der vier Chauffeure, die sich im Turnus abwechselten, war ungebrochen. Dies hatte sicherlich auch damit zu tun, dass der Bus nur selten auf viel befahrenen Strecken unterwegs war. Diese Motivation zeigte sich unter anderem durch ihr Interesse am System des TOHYCO-Riders und daran, wie sie den Besuchern des VHS bereitwillig Auskunft gaben. So war denn auch die Ausstellungsleitung des VHS voll des Lobs für die Chauffeure.

Der Einsatz im VHS gab uns Erfahrungen, welche nun helfen, Verbesserungen am System so vorzunehmen, dass sie den TOHYCO-Rider ein grosses Stück näher an die Industrietauglichkeit bringen.

## 3.6 ANALYSE DES VERHALTENS DER SAM (SUPERCAP)-MODULE

Während dem VHS-Betrieb wurden drei Kontrollen sämtlicher 960 SCAPs durchgeführt. Das erste Mal Mitte Mai 2006, am Anfang des VHS-Betriebs. Das zweite Mal Ende Juni 2006 und das letzte Mal im Januar 2007, knapp drei Monate nach Abschluss des VHS-Betriebs.

Je 40 SCAPs und ihre virtuelle Parallelschaltungen (VP) sind in einem Einschub eingebaut. Jeder der vier SAMs besteht aus sechs solcher Einschübe. Zur Kontrolle wurden ein Einschub nach dem anderen ausgebaut und die Spannungen über jedem einzelnen SCAP gemessen. Durch diese Einzelmessungen konnte festgestellt werden, ob der Ladungsausgleich durch unsere Ausgleichsschaltung VP ("Virtuelle Parallelschaltung") für jeden einzelnen SCAP noch ordnungsgemäss funktionierte.

Die Messungen ergaben:

- Bei 4 von 960 SCAPs ist die VP im Verlaufe der Lebensdauer des SAM-Moduls ausgefallen. 2 dieser 4 SCAPs zeigten bei der dritten Messung eine viel höhere Spannung als die benachbarten. Die zwei andern zeigten bei allen drei Messungen eine Spannung, welche über 0.5V niedriger war als die der Nachbarn. Die gemessenen Abweichungen zeigen aber trotz den Ausfällen umgekehrt, dass bei allen anderen 956 SCAPs der Ausgleich seine Aufgabe zufriedenstellend erfüllte.  
Man darf davon ausgehen, dass die Funktion der VP bei den ersten beiden SCAPs in den letzten drei Monaten des Einsatzes ausfiel. Da die SCAPs aus Sicherheitsgründen aber nie bis auf die maximale Nennspannung aufgeladen wurden, blieb man innerhalb eines sicheren Betriebs.
- Ein weiterer SCAP zeigte bei allen drei Messungen eine Spannung von fast 0V. Es ist davon auszugehen, dass an dieser Stelle der Print mit der VP defekt war.
- Vier Einschübe zeigten kleinere Unterschiede der einzelnen SCAP-Spannungen von +/- 20mV, was tolerierbar ist. Der Grund wird hier bei Parameterstreuungen der Elektronik liegen.

Bei den Havarien konnten fehlerhafte SCAPs ausgeschlossen werden, da ein Austausch der SCAPs nichts am unkorrekten Verhalten änderte.

Zusammengefasst sind als Fazit folgende Aussagen möglich:

Nach diesen Messungen lässt sich sagen, dass sich das Grundkonzept der SAM-Module der FHZ bewährt hat allerdings gewisse Schwächen aufweist. Diese liegen in der Bauart, bzw. Ausführung: Der Service ist noch zu umständlich und die Ausführung der Prototypenserie mechanisch wie elektrisch zu anfällig, um ohne Weiterentwicklung in Serieproduktion zu gehen.

Die Ausfälle können aber relativiert werden, da die SAM-Module zum Zeitpunkt der letzten Messung über 2.5 Jahre alt waren und über 1000 Vollladezyklen und geschätzte 10'000 bis 100'000 Teilzyklen hinter sich hatten. Unter diesen Gesichtspunkten sind 6 fehlerhafte SCAP-Positionen, oder 0.625% aller 960 SCAPs ein beachtlicher Wert für einen Prototypen.

### 3.7 DIE AUXILIARY-VERBRAUCHER

#### 3.7.1 Statische Aufnahme

Die Aufnahme der Werte in Tabelle 5 geschah am Sicherungskasten des Fahrzeugs. Die 7 Minuten zur Berechnung des Energieverbrauchs entsprechen in etwa der Fahrzeit Bahnhof Luzern zum VHS.

Bezeichnung Auxiliaries	Leistung [W]	Energie in 7' [Wh]
Bordelektronik	38.8	4.4
Kompressor	496.6	57.9
Radio-Memory (Standby-Betrieb)	5.3	0.6
Radio-Versorgung (Vol. 50)	11.1	1.3
Radio-Versorgung (Vol. 66)	19.7	2.3
Beleuchtung_Passagiere St. 1	32.4	3.8
Hintere_Tür_offen	28.9	3.4
Vordere_Tür_offen	30.0	3.5
Beide_Türen_offen	50.0	5.8
Fahrgastraumheizung Stufe 1 (nur Ventilator)	59.5	6.9
Fahrgastraumheizung Stufe 2 (nur Ventilator)	78.4	9.1
ECAS_+15	2.3	0.3
Beleuchtung Tacho	9.0	1.1
Stop-Signal	22.7	2.7
Relay D+_on	10.7	1.3
Relay D+_off	9.0	1.1
Kühlwasserpumpe	14.0	1.6
Heizung Seitenfenster	131.9	15.4
Abblendlicht	127.6	14.9
Fernlicht	148.4	17.3
Fensterheber	79.4	9.3
Hupe	35.5	4.1
Cockpit-Belüftung Stufe_1	32.4	3.8
Cockpit-Belüftung Stufe_2	60.9	7.1
Cockpit-Belüftung Stufe_3	110.6	12.9
Cockpit-Belüftung Stufe_4	172.0	20.1
Nebelschlussleuchten	45.7	5.3
Heckscheibenheizung	57.4	6.7
Bremsleuchte	52.8	6.2
Scheibenwischer	46.9	5.5
<b>Maximales Total</b>	<b>2019.9</b>	<b>235.7</b>

**Tabelle 5:** Maximaler Energiebedarf der Auxiliaries

### 3.7.2 Diskussion der Auxiliary-Werte

Die Stromversorgung der Auxiliaries erfolgt über die Bordbatterie, die von einer ZEBRA-Batterie gestützt wird. Beim Nachladen der SCAP-Module wird auch die Zebrabatterie und damit die Energie für die Hilfsverbraucher geladen. Für die Gesamtenergiebetrachtung ist deshalb der Auxiliaries Verbrauch ebenfalls wichtig.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass der maximale Leistungsbedarf der Hilfsgeräte (Auxiliaries) mit 2020W sehr hoch ist. Bei einer Fahrt in 7min zum Verkehrshaus wird mit 236Wh dafür ca. 15% der verfügbaren Traktionsenergie von 1500Wh (SCAP Inhalt) benötigt!

Bei den Auxiliaries gilt es aber, die Einsatzart zu berücksichtigen, denn es werden in der Praxis nie 2.02kW Leistung benötigt werden. So wird der Fensterheber kaum während der ganzen Fahrt in Betrieb sein! Auch die Türbeleuchtung leuchtet nur, wenn die betreffende Tür offen steht. Ähnliches gilt für die Bremsleuchte, die Hupe und das Fernlicht, welches im Stadtbetrieb höchstens vereinzelt als Signal eingesetzt wird.

Aus diesem Grunde können verschiedene Szenarien, wie sie im Betrieb eines Busses auftreten, unterschieden werden. Ein typisches Szenario wird nachfolgend exemplarisch angegeben.

Ein realistisches Szenario für eine Grundversorgung sieht etwa wie folgt aus: Alle Verbraucher, welche zwingend in Betrieb sind, wenn der Bus läuft, sind eingeschaltet. Das Abblendlicht ist aus Sicherheitsgründen immer an. Das Stopp-Signal ist hier wegen der Annahme, dass die Passagiere sofort nach der Abfahrt von einer Haltestelle wieder auf den „Halt“-Knopf drücken, immer an. Dieses Szenario wird in der nachfolgenden Tabelle 6 dargestellt. Auffällig ist, dass der Kompressor  $\approx 60\%$  des Grundverbrauchs ausmacht!

Bezeichnung Auxiliaries	Einsatzzeit [s]	Leistung [W]	Energie [Wh]
Kompressor (beim TR-Bus $\approx 70\%$ Betrieb)	294	496.6	40.56
Kühlwasserpumpe	420	14.0	1.63
Radio-Memory (Standby-Betrieb)	420	5.3	0.62
ECAS +15	420	2.3	0.27
Beleuchtung Tacho	420	9.0	1.05
Stop-Signal	420	22.7	2.65
Abblendlicht	420	127.6	14.89
Versorgung der Bordelektronik	420	38.8	4.53
Beide Türen offen (3-maliges Ein- und Aussteigenlassen)	45	50.0	0.63
Radio-Versorgung (Vol. 50, für Haltestellendurchsage)	10	11.1	0.03
Fensterheber für das Anfahren der Ladestationen	20	79.4	0.44
<b>Summe Grundversorgung</b>			<b>67.30</b>

**Tabelle 6:** Realistischer exemplarischer Grundenergiebedarf der Auxiliaries

### 3.7.3 Zur Bedeutung des Energiebedarfs für die Auxiliaries

Die Auxiliary Leistung ist sehr gross und zeigt aufgrund von zunehmenden Begehrlichkeiten in der Tendenz nach oben. Im allgemeinen müssten hier auch noch die Aufwendungen für die Klimatisierung zusätzlich berücksichtigt werden.

In der Gesamtenergiebilanz schlägt also pro zurückgelegte Strecke nebst dem eigentlichen Traktions-Energiebedarf auch der Energiebedarf der Auxiliaries vor allem über längere Zeitspannen durch langes Stillstehen bei Rotlichtern oder im Stau stark zu Buche. Die Energieeffizienz des Fahrzeugs könnte durch die Optimierung der Auxiliaries, wie etwa beim Kompressor des TR-Busses, stark verbessert werden.

## 4. Öffentlichkeitsarbeit

Der TR-Bus wurde zwischen 2004/5 und 2006 an mehreren Anlässen der Öffentlichkeit und den Medien präsentiert. Die wichtigsten Veranstaltungen sind nachfolgend aufgelistet:

- **TV-Beitrag in der Sendung MTW am 13.05.04 auf SF1 [16]**

Der Beitrag wurde unter dem Titel „Superkapazitäten statt Batterien“ ausgestrahlt. In der Sendung wurde über die Technik des TR-Busses, Eigenschaften und Herstellung der SCAPs, sowie über die Vorbereitungen zum Pilotbetrieb gesprochen.

- **Pilotbetrieb vom 15.07.04 bis 17.10.04**

Während dreier Monate wurde der TR-Bus im öffentlichen Verkehr eingesetzt und war somit für jedermann zugänglich. Folgende Informationsmittel wurden eingesetzt:

- auf einem TFT-Display im Bus wurde eine Power-Point-Präsentation mit Infos zum Bus und der SCAP-Technologie gezeigt,
- ebenfalls auf dem TFT-Display lief eine Echtzeit-Anzeige auf welcher die Fahrgäste den aktuellen Energiestand, die Modulspannungen und Fahrtgeschwindigkeit mitverfolgen konnten,
- alle wichtigen Fahrzeuginformationen konnten auch direkt am Fahrer-MMI betrachtet werden,
- an den beiden Haltestellen wurden Informationssäulen installiert,
- im Bus wurden Flyer und Bilette im TR-Bus-Design verteilt, auf welchen Zusatzangaben enthalten waren und
- zusätzlich wurde ein Tonquiz zur Unterhaltung der Fahrgäste erstellt.

- **Medienkonferenz vom 17.08.04**

An der Medienkonferenz vom 17. August im VHS wurde der TR-Bus im Einsatz offiziell allen Projektpartnern vorgestellt. An der Konferenz nahmen auch mehrere Lokal-Radios und Nachrichtenagenturen aus der ganzen Schweiz teil.

- **Präsentation TR-Bus an Jubiläumsfeier eines Projektpartners vom 24.08.04**

Teilnahme und Präsentation an Jubiläumsfeier der Firma Steinemann Kleinbus AG in Schaffhausen.

- **„Tag ohne Automobil“ der Stadt Luzern am 22.09.04**

Die Teilnahme am „Tag ohne Automobil“ der Stadt Luzern war geplant und vorbereitet, der Termin konnte aber nicht eingehalten werden, weil ein Auffahrunfall in der vorangehenden Woche dies verunmöglichte.

- **Teilnahme an der ESSCAP 2004 in Belfort (FR) vom 03.11.04 bis 05.11.04**

Vorstellen des TR-Busses und der Forschungsaktivitäten der FHZ an der ersten internationalen Supercap-Konferenz in Belfort.

- **Neuseeland**

Vinzenz Härrli nutzte die Zeit während seines Sabbaticals, um den TR-Bus und die Forschungsaktivitäten der FHZ in Neuseeland publik zu machen. Mehrere interessante Kontakte konnten geknüpft werden. So zum Betreiber Stagecoach, zur ARTA (Auckland Regional Transport Authority) und zu DesignLine (Hybridbushersteller mit Lizenz von HESS AG Belach). Insbesondere aber der Erfahrungsaustausch mit der Uni Auckland, wo die induktive Energieübertragung (IPT), welche die Firma Wampfler in Lizenz für den TR-Bus hergestellt hat, erfunden wurde.

- **VHS-Betrieb vom 03.05.06 bis 22.10.06**

Sechs Monate lang stand der TR-Bus vier Tage pro Woche im Einsatz und wurde von den Museumsbesuchern auch rege genutzt. Dabei konnte eine breite Öffentlichkeit den Bus kennenlernen. Für fachlich interessierte Kreise arrangierte und moderierte V. Härrli Informationsveranstaltungen.

## 5. Diskussion, Schlussfolgerungen und Ausblick

Der TR-Bus wurde im Jahr 2004 soweit optimiert und fertig gestellt, dass er sich im öffentlichen Verkehr einsetzen lässt. Dazu wurden nicht nur die technischen Probleme gemeistert, sondern auch die organisatorischen und administrativen Herausforderungen positiv bewältigt.

Im Versuchsbetrieb 2004 lag der Energiebedarf unter dem Referenzwert von 0.1kWh pro Kilometer und pro Tonne. Dieses Ergebnis konnte dank der guten Rekuperationsfähigkeit der SCAPs erzielt werden. Ein vielversprechendes Resultat. Bei einer härteren Stop & Go Einsatzart wäre der Effizienzgewinn noch deutlich höher gewesen.

Während den Messfahrten und dem Versuchsbetrieb im Jahre 2006 konnten systematischere Messungen und Auswertungen durchgeführt werden, welche die grundlegenden Erkenntnisse aus dem Jahre 2004 bestätigten: bei hartem Stop & Go Einsatz zeigen SCAPs auf jeden Fall Vorteile bezüglich Energieeffizienz und übertreffen Batterien sowohl bezüglich Performance und Kosten. Zudem ist die Einsatzart des TR-Busses auf Supercaps optimal zugeschnitten. In Zukunft müssen die modernen Li-Ionen Technologien als Konkurrenz zu den SCAPs dennoch im Auge behalten werden. Der VHS-Betrieb im Jahre 2006 war für das Projektteam eine Bestätigung, dass die SAM Supercap-Speichermodule zufriedenstellend arbeiten. Ebenfalls funktionierte das Regelungskonzept, von wenigen Details abgesehen, bestens. Der Gebrauch eines bordeigenen Historienspeichers liess bei Fehlerfällen brauchbare Rückschlüsse auf die Fehlerquelle zu und führte zu Verbesserungen.

Der Kernteil des Antriebs an sich hat sich während der beiden Einsätze 2004 und 2006 als zuverlässig und weitgehend störungsfrei, wenn auch noch nicht restlos zufriedenstellend, erwiesen. Einige Hilfskomponenten (Auxiliaries) könnten noch optimiert werden, um die Gesamtperformance des Fahrzeugs zu steigern.

Während dem Einsatz des TR-Busses war eine grössere Supportpräsenz nötig als geplant. Bedingt durch die Komplexität des Fahrzeugs wurde 2004 bei jeder noch so kleinen Anomalie Support verlangt. Dies ist verständlich, wenn man bedenkt, in welchem Verkehrsaufkommen sich der TR-Bus 2004 befand. Kein Chauffeur geht gerne das Risiko ein, auf der Luzerner Seebrücke stehen zu bleiben. So führten kleinere Pannen zu Verspätungen oder Ausfällen von Fahrten. 2006 war zwar ebenfalls der Supportaufwand recht gross, doch blieben die Chauffeure angesichts der viel ruhigeren Fahrtstrecke immer sehr gelassen. Insgesamt gelang das Projekt hier nicht zuletzt dank der hervorragenden Zusammenarbeit von VHS, dem ÖVL, der vier immer bestens gelaunten Chauffeure und der FHZ.

Bei einem Forschungsprojekt dieser Grösse ist es schwierig, die Messlatte für Erfolg oder Misserfolg zu setzen. Die beiden Einsätze jedenfalls sind sehr positiv zu werten. Trotz einiger lösbarer Havarien, hat sich die SCAP-Technologie als zuverlässig erwiesen. So musste kein einziger Ausfall des Fahrzeugs auf die SCAP-Speicher zurückgeführt werden. Die Resonanz war zudem bei den Passagieren ausschliesslich positiv.

Während der Testeinsätze hat der TR-Bus seine eingesetzten Technologien überzeugend kommuniziert und aufgezeigt, was mit diesem Konzept möglich ist. Im Laufe der beiden Einsätze konnten viele interessante und vielversprechende Kontakte geknüpft werden, was von grösster Wichtigkeit ist und eines der Ziele des Projekts war.

Für die Zukunft steht die Industrialisierung des TR-Bus Konzepts oder einzelner Teilkomponenten im Vordergrund. Der Schwerpunkt liegt hier speziell bei den SAM-Modulen, an deren Zuverlässigkeit weiter gearbeitet werden muss. Dafür erweisen sich die gewonnenen Daten aus dem Historienspeicher als höchst wertvoll. Weitere Optimierungen an den SAM-Modulen sollen diese SCAP-Pakete zu einem eigenständigen, zuverlässigen und getesteten Produkt machen, das über einen Drittanbieter vertrieben werden kann. Der Einsatz der SAM Module ist dabei nicht nur auf das Feld der Fahrzeugtechnik beschränkt, vielmehr sollen die Module auch für beliebige andere Anwendungen eingesetzt werden können.

Für das Gesamtkonzept wäre als nächster Schritt ein breit angelegter Flottenbetrieb in Zusammenarbeit mit einem Fahrzeughersteller in Betracht zu ziehen, was sicher nicht so einfach zu realisieren ist. Mindestens wäre nach einem Redesign eine Neuauflage eines längerfristigen Pilotbetriebs zweckmässig, um die Weiterentwicklungen zu testen und weitere Industriekreise dafür zu interessieren.

Zum heutigen Zeitpunkt darf das TR-Bus Projekt auch deshalb sehr positiv gewertet werden, weil sich viele der Folgeziele bereits erfüllt haben:

Einerseits werden unsere SAM Supercap Energiespeicher der dritten Generation mit einem hohen Zuverlässigkeitsstandard über einen Drittanbieter in Projekten eingesetzt.

Andrerseits ergaben sich während dem Abschluss dieses Berichtes bereits weiterführende Partnerschaften mit Bus- und Buskomponentenherstellern sowie einem Automobilzulieferanten, der die SAM Technologie industrialisieren will. Auch stehen weitere, konkrete Busprojekte an.

Das Speicher Know-How fließt schlussendlich auch in die neue Strategie des CC IIEE "Living & Mobility" ein, welches sich mit der Thematik Fahrzeug am Netz, bekannt unter V2G (Vehicle To Grid) und der dazu nötigen Infrastruktur beschäftigt. Dies aus der Sicht, wie Mobilität und Wohnen, aber auch die Energieversorgung intelligent miteinander in Einklang zu bringen ist. Es stellt sich unter anderem auch die Frage, wie man sich nebst dem öV-Angebot ganz grundsätzlich energieeffizient vom Wohnhaus wegbegeben kann.

Über die weiterführenden Aktivitäten des CC IIEE informieren die Quellen [17, 18, 19, 20 und 21].

## 6. Dank

Dieses einmalige Projekt konnte nur dank der Mitwirkung einer grossen Anzahl von Partnerfirmen und engagierten Personen realisiert werden. Wir möchten uns ganz herzlich bei den nachfolgenden Industriepartnern und Personen bedanken, die uns mit grossen Eigenleistungen und finanziell unterstützt haben. Einen speziellen Dank möchten wir unseren Hauptfinanzierungspartnern BFE, KTI, Kanton und Stadt Luzern und dem ÖVL (Zweckverband öffentlicher Verkehr), sowie dem Verkehrshaus Luzern für die gute Zusammenarbeit aussprechen.



Aktionsprogramm Energie & Umwelt, Kt. Luzern:	Geldgeber
Baumann Partners GmbH, Luzern	Unterstützung Projektmanagement
BFE, Bundesamt für Energie:	Bund, Geldgeber
Distrelec AG, Näniko:	Unterstützung mit Elektronikkomponenten
Energie Wasser Luzern (ewl), Luzern:	Ladeinfrastruktur und Energie Bahnhof
Energiefonds der Stadt Luzern:	Geldgeber
ESCATEC Switzerland AG, Herrbrugg:	Produktion Elektronik
Impact Memec AG, Langenthal:	Fahrtenanzeige
KTI, Kommission für Technologie+Innovation, Bund:	Geldgeber
Landert Motoren AG, SERVAX Drives, Bülach.	Lieferant Motor
MAXWELL Technologies SA:	Lieferant Supercaps
MES-DEA SA, ZEBRA Battery Department, Stabio:	ZEBRA Notbatterie
ÖVL, Zweckverband öffentlicher Verkehr:	Organisation und Unterstützung Fahrbetrieb
PASOL AG, Titterten:	Consulting in Fahrzeugfragen
Phoenix Contact AG, Tagelswangen:	Überspannungsschutz Elektronik
RTB Rheintal Bus AG, Altstätten SG:	Fahrzeugumbauten
Schiffahrtsgesellschaft des Vierwaldstättersees (SGV), Luzern:	Gastrechtfür Ladeinfrastruktur Bahnhof
Schmidhauser AG, Romanshorn:	Leistungs elektronik
Semafor AG, Basel:	Unterstützung Inbetriebnahme
Steinmann Busse AG Schaffhausen:	Buslieferant
Thommen-Technik, Basel:	Einbau Elektromotor, Getriebeabänderung
Verkehrsbetriebe Luzern (vbl), Luzern:	Organisation Chauffeurs
Verkehrshaus der Schweiz:	Partner Fahrbetrieb, Gastrecht Infrastruktur, Ladeinsel VHS
WIKO AG, Kerns:	Printherstellung Energiespeicher

## 7. Glossar

APU	=	Auxiliary Power Unit, Stromaggregat
CAN	=	<b>C</b> ontroller <b>A</b> rea <b>N</b> etwork. Feldbussystem entwickelt von Bosch. Heute reicht das Einsatzgebiet von CAN weit über den Fahrzeugbereich hinaus
CC IIEE	=	Hochschule Luzern / FHZ Technik + Architektur, Kurzform für Kompetenzzentrum Integrale Intelligente Effiziente Energiesysteme, welches Träger des Projektes war. ( <a href="http://www.hslu.ch/iiee">www.hslu.ch/iiee</a> )
DAQ	=	Data Acquisition, Messgerät zur Datenerfassung
EMV	=	Elektromagnetische Verträglichkeit
FHZ	=	Fachhochschule Zentralschweiz, dem das CC IIEE zugeordnet ist
IPT	=	Inductive Power Transfer, induktive (berührungslose) Ladeeinrichtung, Lösung der Firma Wampfler AG
MMI	=	Man Machine Interface, Display der Fahrers mit allen relevanten Systeminformationen, die über die CAN-Bus Leittechnik geliefert werden. Das MMI enthält auch eine Speicherkarte, die kontinuierlich die Fahrdaten aufnimmt.
RF	=	Radio Frequency (Funkverbindung)
SAM	=	"Super Accumulator Module", Bezeichnung des CC IIEE für ein Speicherkonzept, das hohe Energiedichte, hohe Leistungsdichte mit einem intelligenten Management verbindet. Beim TR-Bus bestehend die SAM ausschliesslich aus SCAPs und Management, während das allgemeine Konzept die geeignete Mischung von Batterien und SCAPs vorsieht.
SCAP	=	Superkapazitäten; elekt. Energiespeicher; Kondensator mit hoher Kapazität und sehr kleinem Innenwiderstand
SGV	=	Schiffahrtsgesellschaft des Vierwaldstättersees
TOHYCO	=	<b>T</b> otal <b>H</b> ybrid-Electric <b>C</b> oncept for an Ultra Low Emission and Consumption Car. Anwendungsplattform für SAM im Bereich Hybrid- und Elektrofahrzeugen
TR	=	TOHYCO-Rider; Kleinbus, der als Energiespeicher ausschliesslich SCAPs verwendet und mit einer induktiven Energieübertragung ausgerüstet ist.
TR-Group	=	TOHYCO-Rider Group. Konsortium das das Projekt TOHYCO-Rider unter der Führung der FHZ realisiert hat.
VHS	=	Verkehrshaus der Schweiz in Luzern
VP	=	Vom CC IIEE patentierte " <b>V</b> irtuelle <b>P</b> arallelschaltung", eine Schaltungsvariante, die den Ladungsausgleich unter den SCAPs bewerkstelligt und Überwachungsfunktionen wahrnimmt.
ZEBRA	=	NaNiCl Batterietyp der Firma MES-DEA in Stabio (Kanton Tessin). Eine der momentan weltweit besten Traktionsbatterien mit hohem Integrationsstandard, die im TR-Bus als Board und Notbatterie im Einsatz steht. Sie lässt im Notfall eine von den Ladeinseln unabhängige Reichweite von ca. 25km zu.

## 8. Referenzen

- [1] V.Härri: **Projekteingabe zur Verfügung 69860 des Projektes TOHYCO-Rider mit "SAM"-Superkapazitätenspeicher**, Hochschule Luzern CC IIEE, CH-6048 Horw, Nov.98
- [2] S.Egger, P.Erni, D.Leuenberger, G.Marinkovic: **BFE Jahresbericht 1999, TOHYCO-Rider mit "SAM"-Superkapazitätenspeicher**, Hochschule Luzern CC IIEE, CH-6048 Horw, Dez 99
- [3] V.Härri, S.Egger: **BFE Jahresbericht 2000, TOHYCO-Rider mit "SAM"-Superkapazitätenspeicher**, Hochschule Luzern CC IIEE, CH-6048 Horw, Dez 00
- [4] V.Härri, S.Egger: **BFE Jahresbericht 2001, TOHYCO-Rider mit "SAM"-Superkapazitätenspeicher**, Hochschule Luzern CC IIEE, CH-6048 Horw, Dez 01
- [5] V.Härri, S.Egger: **BFE Jahresbericht 2002, TOHYCO-Rider mit "SAM"-Superkapazitätenspeicher**, Hochschule Luzern, CH-6048 Horw, Dez 02
- [6] V.Härri, S.Egger, D.Gambetta: **BFE Jahresbericht 2001, Super-Accumulator-Module (SAM)**, Hochschule Luzern, CH-6048 Horw, Dez 01
- [7] V.Härri, S.Eigen: **BFE Schlussbericht 2002, Super-Accumulator-Module (SAM)**, Hochschule Luzern, CH-6048 Horw, Dez 02
- [8] V.Härri, P.Erni, S.Egger, P.Schweizer: **PSEL Studie-154: "Anwendungspotential von Superkapazitätenspeichern SAM"**, Hochschule Luzern, CH-6048 Horw, Juli 00
- [9] V.Härri, S.Egger: **Proceeding EVS-18, Supercapacitor Circuitry Concept "SAM" for Public Transport Vehicles and other Applications**, Hochschule Luzern CC IIEE, CH-6048 Horw, Juli 01
- [10] V.Härri, S.Egger: **All-Purpose Circuitry Concept "SAM", Applications and Networking for Supercapacitors, Proceedings Boostcap-Day Montena-Components**, Hochschule Luzern CC IIEE, CH-6048 Horw, März 01
- [11] **maxwell technologies sa.**, CH-1728 Rossens, www.maxwell.com
- [12] **www.hslu.ch/iiee**, **www.supercapacitor.org**, **www.ultracapacitor.org**
- [13] **Simplorer Version 6.x**; www.ansoft.com
- [14] V.Härri, S.Egger, S.Eigen: **Industrietauglicher Superkapazitätenspeicher SAM**, Schlussbericht Dezember 2002, KTI Projekt 4504.1 FHS, Januar 2003, Hochschule Luzern CC IIEE, CH-6048 Horw
- [15] V.Härri, S.Eigen, B.Zemp, D.Carriero: **BFE Jahresbericht 2003, TOHYCO-Rider mit "SAM"-Superkapazitätenspeicher**, Hochschule Luzern CC IIEE, CH-6048 Horw, Dez 03
- [16] Ueli Sax: **Supercaps statt Batterien**, TV-Beitrag ausgestrahlt am 13.05.04 auf SF1 in der Sendung MTW.
- [17] Vinzenz V. Haerri, Drago Martinovic: **Supercapacitor Module SAM for Hybrid Busses: an Advanced Energy Storage Specification based on Experiences with the TOHYCO-Rider Bus Project**, Proceedings of the 2007 IEEE Conference IECON-07 in Taipei, Taiwan, November 2007, Lucerne University of Applied Sciences & Arts - Center of Competence Efficient Energy Systems, CH-6048 Horw, www.hslu.ch/iiee
- [18] V.V.Härri, P.Schweizer: **Supercapacitor Module SAM for Hybrid Drives: A 3rd Generation Specification Including Energy Management**, Symposium "International Advanced Mobility Forum IAMF" am des Autosalon Genf, 11.März 08, Hochschule Luzern Technik&Architektur, CH-6048 Horw
- [19] [P.Schweizer, V.V.Härri: **Dezentrale Energiespeicherung im System Gebäude & Mobilität**, Beitrag Symposium "Energiewende Graz" Febr. 08, Hochschule Luzern Technik&Architektur, CH-6048 Horw
- [20] V.V. Haerri, U. Madawala, D. Zabkar: **An Electric Micro-Scooter with a Super-capacitor Energy Buffer**, in Proc. 2008 IEEE Sustainable Energy Technologies Conference ICSET, Singapore, 24-27 Nov. 2008
- [21] U. Madawala, P. Schweizer, V.V. Haerri: **Living and Mobility- A Novel Multipurpose in-house Grid Interface with Plug in Hybrid Blue-Angel**, in Proc. 2008 IEEE Sustainable Energy Technologies Conference ICSET, Singapore, 24-27 Nov. 2008

# Anhang: Kommentierter Bildbericht

## Inhaltsverzeichnis Anhang

<b>1. TOHYCO-Rider</b> .....	48
<b>2. Projektteam</b> .....	50
<b>3. Technik des TOHYCO-Rider Busses</b> .....	51
<b>4. Montagen und Vorbereitungsarbeiten</b> .....	56
<b>5. Tests und Inbetriebnahmen</b> .....	59
<b>6. Der TOHYCO-Rider Bus in der Öffentlichkeit</b> .....	60

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 TR-Bus beim Quai 2.....	48
Abbildung 2 Der TR-Bus auf der Fahrt zum Verkehrshaus .....	48
Abbildung 3 Der TR-Bus mit den Partnerlogos .....	49
Abbildung 4 Projekt Kernteam in Altstätten SG (Rheintalbus AG) und in Horw ( Hochschule Luzern) .....	50
Abbildung 5 Kernteam im Zeltunterstand Horw und bei einer der unzähligen Sitzungen .....	50
Abbildung 6 Übersicht Komponenten des TR-Busses .....	51
Abbildung 7 Der Antrieb .....	52
Abbildung 8 Das Interieur.....	52
Abbildung 9 Fahrerinformationspanel (MMI) .....	53
Abbildung 10 Das MMI .....	53
Abbildung 11 SAM Modul.....	54
Abbildung 12 SAM-Beschaltungselektronik.....	54
Abbildung 13 Kommunikationselektronik .....	55
Abbildung 14 Hauptstromverteilung im doppelten Boden, sowie eingebaute SAM Module .....	55
Abbildung 15 Montagearbeiten .....	56
Abbildung 16 Verlöten der Kabelschuhe an den Hochfrequenzkabeln der IPT Ladeinseln. ....	56
Abbildung 17 Arbeiten an der IPT Ladestation beim Bahnhof.....	57
Abbildung 18 Arbeiten an der IPT Infrastruktur beim Verkehrshaus der Schweiz (IMAX).....	57
Abbildung 19 Informationssäulen an den Haltestellen .....	58
Abbildung 20 Letzter Feinschliff .....	58
Abbildung 21 TR auf dem Rollprüfstand .....	59
Abbildung 22 Messungen während der Inbetriebnahme .....	59
Abbildung 23 Inbetriebnahme IPT Ladestation beim Verkehrshaus.....	59
Abbildung 24 Der TR-Bus 2002 auf dem Bahnhofplatz.....	60
Abbildung 25 Der TR-Bus im Einsatz bei den Ladestationen am Bahnhof und beim Verkehrshaus.....	60
Abbildung 26 Apero der Medienkonferenz vom 17.08.2004 und Aufnahmen von SF DRS .....	61
Abbildung 27 Der TR-Bus an der Ausstellung "Top oder Flop" 2006 im Verkehrshaus .....	61

# 1. TOHYCO-Rider



**Abbildung 1 TR-Bus beim Quai 2**

Der TOHYCO-Rider Kleinbus fährt beim Quai 2 der Schifffahrtsgesellschaft Luzern (Bahnhofplatz) auf die am Boden eingelassene induktive Energieübertragungs-Plattform IPT.



**Abbildung 2 Der TR-Bus auf der Fahrt zum Verkehrshaus**

Der TR auf dem Weg vom Bahnhof zum Verkehrshaus im Testbetrieb 2004, nahe Würzenbach.



**Abbildung 3 Der TR-Bus mit den Partnerlogos**

**Partner des TR-Bus Projekts:**

- |                           |   |
|---------------------------|---|
| AfU Luzern:               | Amt für Umweltschutz des Kanton Luzern; Beratung und finanzielle Unterstützung  |
| Baumann Partners GmbH:    | Controlling und Consulting  |
| BFE                       | Finanzierungspartner Energie Schweiz  |
| BUSiness                  | Handelsgesellschaft für Kleinbusse; beliefert schweizerische Verkehrsbetriebe   |
| (Steinemann Kleinbus AG): |   |
| KTI                       | Finanzierungspartner  |
| MAXWELL:                  | Teilunternehmen des Konzerns montena; weltweit Marktleader im Bereich Supercaps, 300 MA, Lieferant Supercaps  |
| Omni Nova:                | Omni Nova ist eine schwedische Firma, die Kleinbus-Chassis der Firma FIAT umbaut. Sie liefert die genauen Unterlagen des Chassis und der Fahrzeugelektrik die für den Umbau nötig sind. |
| PASOL AG:                 | Consulting Batterien und Alternativfahrzeuge; Konzept MMI Programmierung  |
| Rheintal Bus AG:          | ca. 50 Busse, Werkstätten und angegliederte Installationsfirma für Elektrosteuerungen (Elektronik-KnowHow). Umbauort des Kleinbusses.   |
| Stadt Luzern              | Der Energiefonds der Stadt Luzern unterstützt das Projekt   |
| Thommen-Technik:          | Konstruktion Elektroantrieb für den TR-Bus  |
| vbl                       | Verkehrsbetriebe Luzern, stellt Chauffeur und Infrastruktur für die Buswartung bereit.  |
| Verkehrshaus der Schweiz: | Zieldestination, Ziel-Ladeinfrastruktur, Marketingaktivitäten   |
| Wampfler AG:              | Berührungslose und flexible Energiezuführungen. 500 MA. Erfahrung mit induktiver Energieübertragung (vgl. Rotorua in NZ, Genua, etc.). Liefert die induktive Energieübertragung.        |
| ...UND.....               | ...viele weitere Partner, denen an dieser Stelle ebenfalls für dir Unterstützung gedankt wird!  |

## 2. Projektteam



Abbildung 4 Projekt Kernteam in Altstätten SG (Rheintalbus AG) und in Horw ( Hochschule Luzern)



Abbildung 5 Kernteam im Zeltunterstand Horw und bei einer der unzähligen Sitzungen

### 3. Technik des TOHYCO-Rider Busses

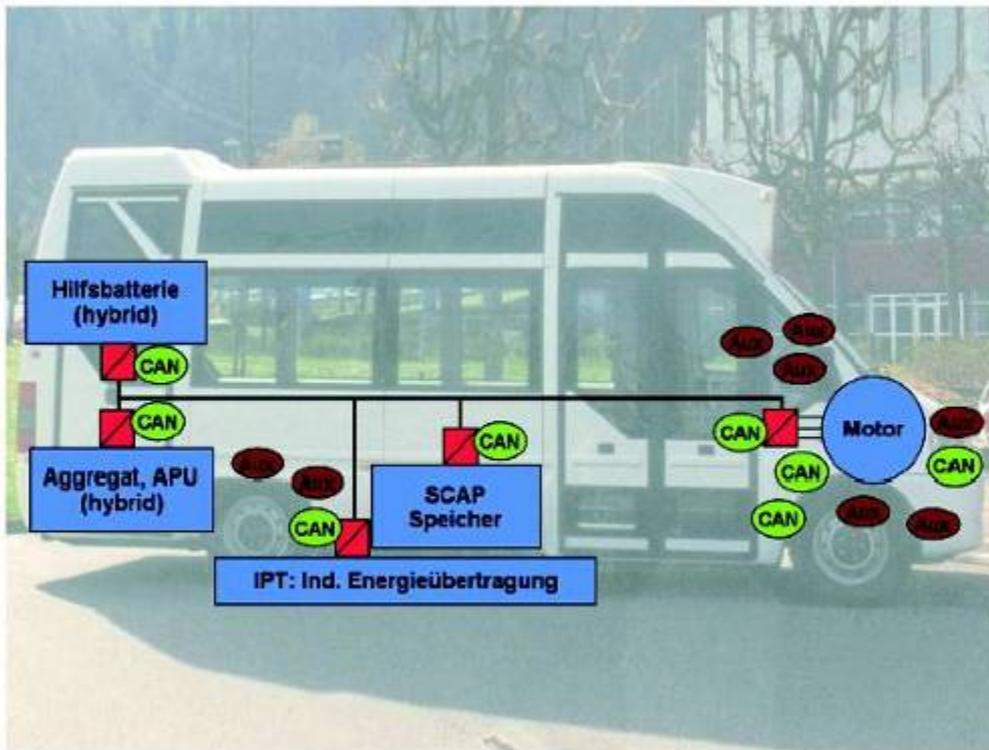


Abbildung 6 Übersicht Komponenten des TR-Busses

#### STECKBRIEF

##### Superkapazitäten:

- 960 SCAPs mit 1800F (4 Module mit 7.5F)
- Energieinhalt brutto bei 600 V = 1.5 kWh
- Beschaltung der SCAPs für Ladungsausgleich (Patent Hochschule Luzern)

##### Notbatterie:

- ZEBRA NaNiCl Batterie für Notfahrten (max. 20km), MES-DEA

##### Leistungselektronik:

- 5 wassergekühlte DC/DC Wandler (Lenze)
- wassergekühlter Motorwechselrichter (Lenze), 100kW
- Pick-Up Spule für Schnellladung (IPT) inkl. Gleichrichter für 30 kW (Wampfler)
- 1 DC/DC Wandler für die 12V Boardspeisung ab 600V für 1kW (BRUSA)

##### Leitsystem:

- 12 CAN Knoten (Mtorola HC908 bzw. HCS12)
- 1 Materknoten
- Energieflussregelung
- Steuerung der Schnellladung über Funk
- Überwachungs- und Redundanzsystem
- Diagnosesystem



**Abbildung 7 Der Antrieb**

Motorendaten:

- Asynchronmotor (ASM), wassergekühlt
- Nennleistung 30kW, Spitze 70kW
- Nenndrehzahl 6000 rpm (70km/h)
- max. Drehmoment 320 Nm (0-3200 rpm)
- Gewicht 98 kg
- Max. Wirkungsgrad 95 %



**Abbildung 8 Das Interieur**

Der Endausbau des TR-Busses war von sehr engen Platzverhältnissen geprägt. Die SAM-Module mussten so unter den Sitzen verteilt werden, dass ein optimaler Personenschutz, sowie gleichzeitig eine optimale Verlegung von Lüftungs- und Verkabelungsleitungen möglich waren.



**Abbildung 9 Fahrerinformationspanel (MMI)**

Um die Handhabung des TR-Busses zu vereinfachen und einen optimalen Support während dem Pilotbetrieb zu gewährleisten, ist ein attraktives, innovatives und benutzerfreundliches Fahrer- und Diagnosesystem zur Visualisierung der Systemzustände erstellt worden, das an den CAN-Bus des Fahrzeugs angebunden ist. Die Überwachung des Gesamtsystems, sowie eine sofortige Anzeige im Fehlerfall gehören zu den Hauptaufgaben. Dabei soll das Diagnosesystem verschiedenen Anwendern in unterschiedlichen Situationen Unterstützung bieten: dem Fahrer im Betrieb, dem Servicemonteure während der Wartung sowie dem Entwickler beim Testen.



**Abbildung 10 Das MMI**

Zusätzlich ist im Innern des Busses ein Fahrgastraum-Infosystem montiert. Auf einem 19 Zoll Bildschirm wird den Fahrgästen auf Deutsch und Englisch das innovative Projekt genauer erläutert. Mittels Bildern, Text, Ton und Video wird schrittweise die Funktion der einzelnen Komponenten (Supercapss, SAM-Module, DC/DC-Wandler, etc.) erklärt. Während der Fahrt wird auf demselben Display auch der Systemzustand angezeigt. Darauf ist der Spannungswert bzw. der Energieinhalt der SAM-Module, die Energieflussrichtung, sowie Geschwindigkeit und Drehzahl ersichtlich. Somit kann der Fahrgast die Fahrt mit technischen Daten mitverfolgen. Das Fahrgastraum-Infosystem bezieht seine Daten ebenfalls vom CAN-Bus und bedient sich dabei eines Notebooks, der in einer eigens dafür gebauten Halterung hinter dem Fahrersitz angebracht ist. Der Fahrer kann mittels einer externen Schalterbox zwischen der Präsentation und dem Echtzeitbildschirm umschalten.



**Abbildung 11 SAM Modul**

Als Energiespeicher verwendet der TOHYCO-Rider anstelle herkömmlicher aufladbarer Batterien elektrische Hochleistungskondensatoren, sogenannte Superkapazitäten (Scaps), die eine unendliche Lebensdauer haben und nicht wie Batterien dauernd ersetzt werden müssen. Sie können auch mit besserem Wirkungsgrad und mit hoher Leistung geladen werden, weshalb ein schnelles Nachladen an den Haltestellen möglich ist. Das Bild zeigt eines der 24 SAM Module (Super Accumulator Module), in dem die Integration der Supercap Komponenten zu sehen ist.



**Abbildung 12 SAM-Beschaltungselektronik**

SAM Ansteuerung:

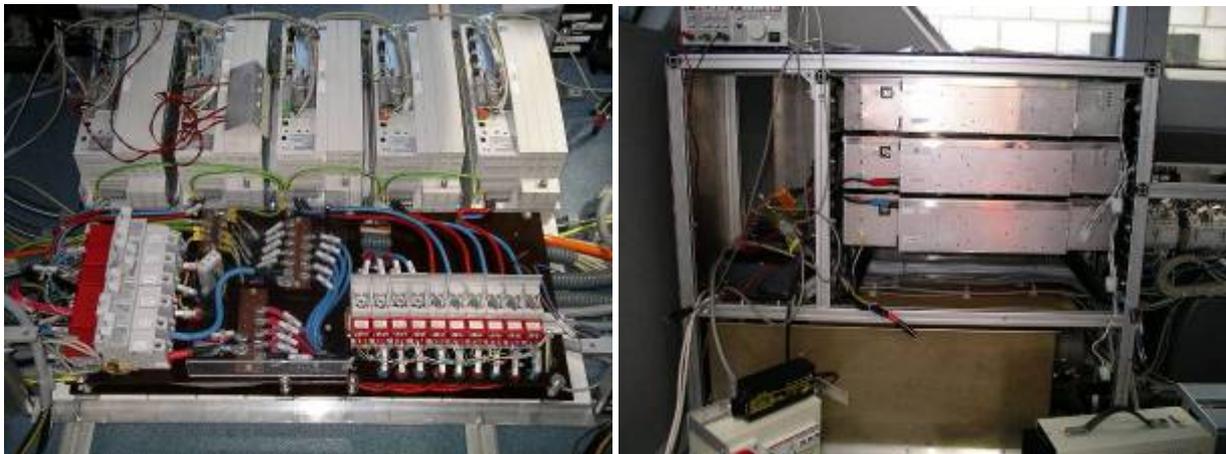
Um die Funktionstüchtigkeit der SAM-Module zu gewährleisten und überwachen zu können, wurde für die Beschaltungselektronik eine Ansteuerelektronik entwickelt. Diese Elektronik bedient eines der 4 Module mit 240 SCAPs und übernimmt folgende Funktionen:

- Messung der Modulspannung
- Messung des Modulstromes
- Registrierung der Temperatur jedes SCAPs
- Registrierung der Zellenspannung jedes SCAPs
- Ladungsausgleich bei unsymmetrisch geladenen Supercaps
- nichtflüchtige Archivierung relevanter Daten, die wertvollen Aufschluss über die Funktionstüchtigkeit sowie die Zuverlässigkeit der SCAP Zellen erlauben.



**Abbildung 13 Kommunikationselektronik**

Alle im TR-Bus vorhandenen Systemkomponenten sind mittels eines seriellen Bussystems, basierend auf dem CAN-Bus-Standard, miteinander verbunden. Über dieses Medium wird die gesamte Kommunikation und die Regelung vorgenommen. Das System besteht aus je einem CAN-Knoten pro 6 SAM-Module, sowie einem Master-, einem MMI- (Fahrerinteraktionen), 4 Drive- (Antrieb), einem IPT- (induktive Energieübertragung), sowie einem Notbatterie-CAN-Knoten.



**Abbildung 14 Hauptstromverteilung im doppelten Boden, sowie eingebaute SAM Module**

Zu sehen sind links die mit Meldekontakten versehenen Hauptstromsicherungen, sowie Gleichstromwandler (DC/DC) für die Spannungsanpassung der SAM-Module.

Rechts sind drei eingebaute SAM-Module sowie die ZEBRA-Notbatterie zu sehen. Die Zebra-Batterie erlaubt es auch, Ladeinsel unabhängig kurze Fahrten bis zum Depot auszuführen. Im Normalbetrieb wird der Energieinhalt der Zebra-Batterie nicht benötigt und die Batterie auf ihrer vollen Ladung

## 4. Montagen und Vorbereitungsarbeiten



**Abbildung 15 Montagearbeiten**

In der intensiven Montagephase standen bis zu 10 Mitarbeiter im Einsatz.



**Abbildung 16 Verlöten der Kabelschuhe an den Hochfrequenzkabeln der IPT Ladeinseln.**



**Abbildung 17 Arbeiten an der IPT Ladestation beim Bahnhof**

Das Einsatzkonzept des TOHYCO-Riders sieht vor, dass der Supercap-Energieinhalt nur von Haltestelle zu Haltestelle, wo berührungslos nachgeladen wird, reicht. Gezeigt wird dieses Konzept allerdings aus Kostengründen nur mit 2 Ladestationen beim Bahnhof Luzern und beim Verkehrshaus. In ca. 3 bis 4 Minuten wird das Fahrzeug Minuten für eine 4km Fahrt nachgeladen. Diese Energieaufladung könnte ein Lösungsansatz für zukünftige städtische Nahverkehrsmittel im Flottenverband sein, bei denen sich viele Fahrzeuge die teure Infrastruktur der Ladestation teilen. Das Bild zeigt Arbeiten an der Ladestation beim Bahnhof Luzern.



**Abbildung 18 Arbeiten an der IPT Infrastruktur beim Verkehrshaus der Schweiz (IMAX)**

Vor dem IMAX des Verkehrshauses wurde die zweite Ladestation erstellt. Die Installation einer Haltestelle konnte innerhalb von zwei Arbeitstagen fertig gestellt werden. Das Bild rechts zeigt die Stromversorgung für die IPT Aufladung im Keller des IMAX im Verkehrshaus.



**Abbildung 19 Informationssäulen an den Haltestellen**

Die beiden Haltestellen des TOHYCO-Riders wurden mit einer übergrossen Informationssäule, die einen übergrossen Supercap darstellt, gekennzeichnet. Darauf wurden der Fahrplan und Informationen über das Projekt angebracht.



**Abbildung 20 Letzter Feinschliff**

Dem Bus erhält vor dem Öffentlichkeitsauftritt den letzten Feinschliff.

## 5. Tests und Inbetriebnahmen



**Abbildung 21 TR auf dem Rollprüfstand**

Für die Überprüfung der Performance des TR wurde der Rollenprüfstand der Berner Fachhochschule in Biel zu Hilfe genommen. Die Zielsetzung war dabei einerseits, genaue Tests des gesamten Antriebsstranges inkl. Mechanik bei erhöhter Maximalgeschwindigkeit als Teil der Gesamteinbetriebsetzung durchzuführen.



**Abbildung 22 Messungen während der Inbetriebnahme**



Testen der IPT Ladestation beim Verkehrshaus. Gleichzeitig wurden vom Schweizer Fernsehen mit einer Bodenkamera Videoaufnahmen des Ladevorgangs erstellt.

**Abbildung 23 Inbetriebnahme IPT Ladestation beim Verkehrshaus**

## 6. Der TOHYCO-Rider Bus in der Öffentlichkeit



**Abbildung 24 Der TR-Bus 2002 auf dem Bahnhofplatz**

Zum ersten mal wurde eine erste Version des Prototypen am 25.6.2002 auf dem Bahnhofplatz vorgestellt. Es sollte weitere 2 Jahre dauern, bis der öffentlichen Einsatz des Busses stattfinden konnte. In dieser Zeit wurde die gesamte Innenmontage optimiert, die Energiespeicher auf den neusten Stand gebracht, sowie der Testbetrieb vorbereitet.



**Abbildung 25 Der TR-Bus im Einsatz bei den Ladestationen am Bahnhof und beim Verkehrshaus**

Im Sommer 2004 war es dann soweit: Die Passagiere nehmen Platz und der Chauffeur, der nach dem IPT Ladevorgang den Bus umsichtig vom Bahnhof Luzern zum Verkehrshaus der Schweiz steuert, erklärt während der Fahrt den Passagieren das Besondere an diesem Fahrzeug, einem weltweit einzigartigen „fahrenden Demonstrator“. Die Testfahrten fanden im Sommerhalbjahr 2004, sowie in der Ausstellung "Top oder Flop" des Verkehrshauses im Jahr 2006 statt.



**Abbildung 26 Apero der Medienkonferenz vom 17.08.2004 und Aufnahmen von SF DRS**

Während dem Betrieb des TR-Busses wurde am 17.8.04 im Verkehrshaus eine Medienkonferenz abgehalten, welche ein grosses Echo fand. Das Schweizerfernsehen strahlte am 5.2.03 (CH aktuell), sowie am 13.5.04 (MTW) Beiträge über den TR-Bus aus.



**Abbildung 27 Der TR-Bus an der Ausstellung "Top oder Flop" 2006 im Verkehrshaus**

Im Jahre 2006 kam der TR-Bus im Rahmen der Sonderausstellung "Top oder Flop" des Verkehrshauses ein zweites Mal zum Einsatz. Dabei wurden den Besuchern Testfahrten angeboten, die im Areal starteten und endeten.