

# **Potenziale eines hybriden Fahrzeugantriebs in einem Abfallsammelfahrzeug**

## **Potentials of a Hybrid Drive Train for Refuse Collector Vehicles**

Dipl.-Ing. **T. Knoke**, Prof. Dr.-Ing. **J. Böcker**, Universität Paderborn

### **Kurzfassung**

Aufgrund des besonderen Fahrspiels eines Abfallsammelfahrzeugs, das durch sich häufig abwechselnde Brems- und Beschleunigungsvorgänge gekennzeichnet ist, ermöglichen hybride Fahrzeugantriebe eine deutliche Verbrauchsreduzierung. Mit der hier vorgestellten parallelen Hybridstruktur ist ein Verbrauchersparnis von 30% und mehr möglich. Dieser Ersparnis stehen allerdings hohe Mehrkosten, insbesondere für den elektrischen Energiespeicher, gegenüber. Unter wirtschaftlichen Aspekten ist eine Speichergröße im Bereich von 5 MJ sinnvoll. Allerdings ist mit dieser Speichergröße der rein elektrische Betrieb des Pressmüllaufbaus während des Sammelzyklus nicht möglich.

### **Abstract**

Due to the stop-and-go duty cycle of refuse collector vehicles, hybrid drive trains allow significant fuel saving. The proposed parallel hybrid structure offers a fuel saving of 30% and more. High premium costs, in particular for the electrical energy storage, face this saving. Under economic aspects a storage capacity in the range of 5 MJ is considerable. However, based on this storage size, a pure electrical operation of the collector unit during the collection cycle is not possible.

### **1. Einleitung**

Gegenwärtig werden hybride Fahrzeugantriebe als ein Schritt in Richtung umweltfreundlicher Fahrzeuge akzeptiert. Der Fokus des Interesses liegt auf Pkw. Neben Pkw bieten aber auch andere Fahrzeugklassen, insbesondere Nutz- und Sonderfahrzeuge, ein interessantes, vielversprechendes Potenzial für hybride Fahrzeugantriebe.

So ist zum Beispiel das Fahrspiel von Abfallsammelfahrzeugen gekennzeichnet durch sich häufig abwechselnde Brems- und Beschleunigungsvorgänge, sodass die mit den meisten hybriden Fahrzeugantrieben mögliche Rekuperation von Bremsleistung eine deutliche

Verbrauchseinsparung verspricht. Weitere Vorteile können sich durch den elektrischen Betrieb des Pressmüllaufbaus in lärmsensiblen Umgebungen, z.B. Wohngebieten, ergeben. Die Idee hybrider Abfallsammelfahrzeuge ist nicht neu. In den letzten Jahren wurden verschiedene Projekte gestartet, um das Potenzial abzuschätzen. Eine Übersicht der Projekte findet sich in [2].

Im Rahmen des EU-Projektes „CLEANOWA (Cost-effective system for cLEAN and NOiseless WAstE collection)“ unter der Führung des schwedischen Unternehmens Renova AB (Göteborg) wurden in den Jahren 2003-2006 15 hybride Sammelfahrzeuge untersucht. Diese verfügen über einen elektrisch-hydraulisch betriebenen Pressmüllaufbau. Der Antriebsstrang besteht aus einem konventionellen, gasbetriebenen Verbrennungsmotor, der um eine Start-Stopp-Funktion erweitert wurde. Die für den Betrieb erforderliche elektrische Leistung wird durch Blei-Säure-Batterien bereitgestellt, die über Nacht stationär geladen werden [1]. Im Unterschied dazu kommt die hier vorgestellte Struktur durch die direkte Integration eines elektrischen Antriebs in den Antriebsstrang ohne stationäre Nachladung aus.

In diesem Beitrag wird, ausgehend von einem konventionellen Abfallsammelfahrzeug, der Entwurf einer Struktur für ein hybrides Sammelfahrzeug vorgestellt. Diese Struktur ermöglicht neben dem elektrischen Betrieb des Pressmüllaufbaus auch die Rekuperation der Bremsleistung. Auf dieser Struktur aufbauend werden die einzelnen Komponenten bemessen. Ausgehend von Simulationsmodellen werden anhand von gemessenen Fahrspielen die Verbrauchseinsparungen dargestellt. Abschließend wird auf der Grundlage eines einfachen Kostenmodells eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt.

## **2. Konventionelles Abfallsammelfahrzeug**

Abfallsammelfahrzeuge basieren auf Standard-Lkw Fahrgestellen, die um einen Pressmüllaufbau erweitert werden. In dem Aufbau wird der Abfall gesammelt und komprimiert (s. Bild 1). Angetrieben wird der Pressmüllaufbau hydraulisch, wobei der Hydraulikmotor mit einem Nebetrieb des Verbrennungsmotors verbunden ist. Dieses hat zwei wesentliche Nachteile. Zum einen erfordert der Betrieb des Pressmüllaufbaus, der häufig im Stand erfolgt, eine Drehzahlanhebung des Verbrennungsmotors und damit eine erhöhte Lärmbelästigung. Zum anderen ist die notwendige hydraulische Leistung gering, sodass die Bereitstellung in einem für den Verbrennungsmotor ungünstigen Arbeitspunkt erfolgt. In Bild 2 ist die Struktur des Antriebsstrangs eines konventionellen Sammelfahrzeugs dargestellt. Die technischen Daten des hier betrachteten Fahrzeugs sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Für die Leistung des Pressmüllaufbaus ist ein Mittelwert angegeben. Die Leistungsspitzen können deutlich darüber liegen.

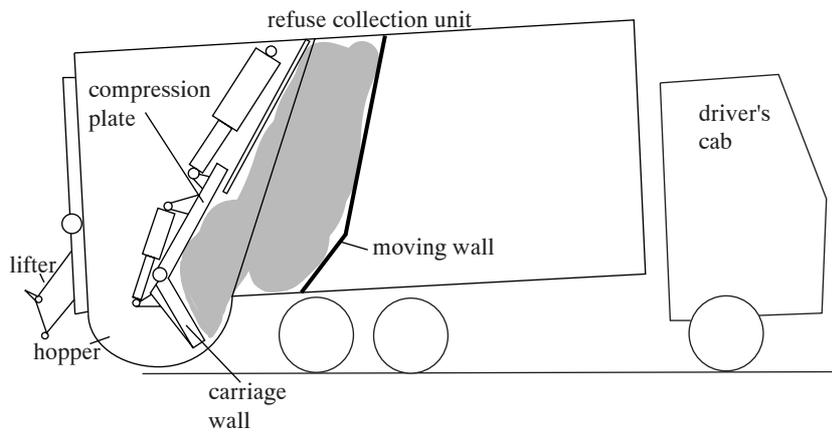


Bild 1: Pressmüllaufbau

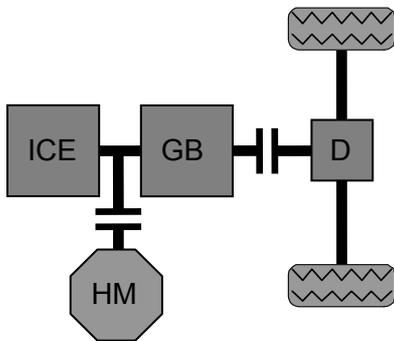


Bild 2: Strukturbild des konventionellen Antriebsstrangs (ICE: Verbrennungsmotor, HM: Hydraulikmotor, GB: Getriebe, D: Differential)

Tabelle 1: Technische Daten des konventionellen Abfallsammelfahrzeugs

Verbrennungsmotor <sup>1</sup>	260 kW @ 1800 U/min, 1.695 Nm @ 1.200 U/min, 6 Zylinder, 10 l Hubraum, Diesel
Gewicht (leer/max.)	13.000 kg / 26.000 kg
Frontfläche	8,58 m <sup>2</sup>
Luftwiderstandsbeiwert ( $c_w$ )	0,7
Reifen	315/80R22.5
Gänge (Übersetzungsverhältnisse)	6 (3,49, 1,86, 1,41, 1,00, 0,75, 0,65)
Übersetzung Differential	6,84
Leistungsaufnahme Pressmüllaufbau	22 kW

<sup>1</sup> Daten entnommen aus ADVISOR Stand 2002

### 3. Hybrides Abfallsammelfahrzeug

Der Entwurf des hybriden Abfallsammelfahrzeugs erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird die Struktur des Antriebsstrangs festgelegt. In einem zweiten Schritt erfolgt dann die Bemessung der verwendeten Komponenten. Für die Wirtschaftlichkeit von Abfallsammelfahrzeugen sind das Leergewicht und damit die mögliche Zuladung von entscheidender Bedeutung. Je kleiner die Zuladung, desto weniger Abfall kann aufgenommen werden, und desto häufiger muss das Fahrzeug an einem Sammelplatz oder einer Deponie entleert werden. Aus diesem Grund ist bei der Auswahl der Struktur darauf zu achten, dass möglichst wenige zusätzliche Komponenten verwendet werden. Auch bei der Bemessung der Komponenten, insbesondere beim Energiespeicher, ist eine Abwägung zwischen Verbrauchsvorteilen auf der einen und zusätzlichem Gewicht auf der anderen Seite erforderlich.

#### 3.1 Festlegen der Struktur

Bei der Auswahl der Struktur sind zwei wesentliche Aspekte zu berücksichtigen:

1. Um das Verbrauchseinsparpotenzial, das sich durch die häufigen Beschleunigungs- und Bremsphasen eines Sammelfahrzeugs ergibt, zu nutzen, soll es möglich sein, einen Teil der anfallenden Bremsleistung zu rekuperieren.
2. Der Hydraulikmotor des Pressmüllaufbaus soll elektrisch angetrieben werden können.

Eine vorteilhafte Struktur, mit der sich sowohl die Rekuperation von Bremsleistung als auch der elektrische Betrieb des Pressmüllaufbaus realisieren lassen, ist in Bild 3 dargestellt (Parallelhybrid).

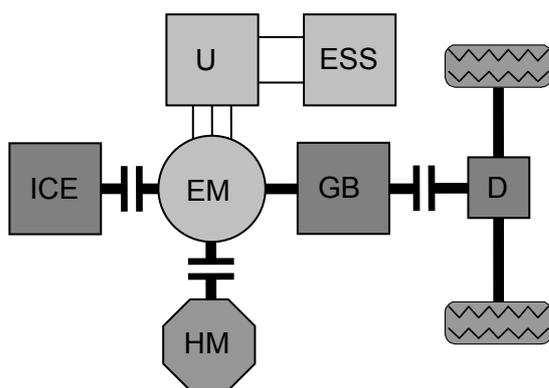


Bild 3: Strukturbild des hybriden Antriebsstrangs (ICE: Verbrennungsmotor, HM: Hydraulikmotor, EM: elektrische Maschine, U: Umrichter, ESS: elektrischer Energiespeicher, GB: Getriebe, D: Differential)

## **3.2 Bemessen der Komponenten**

### **Verbrennungsmotor**

Bei der gewählten Struktur des Antriebsstrangs ist es prinzipiell möglich, dass sich die Leistungen des Verbrennungsmotors und der elektrischen Maschine addieren, sodass der Verbrennungsmotor kleiner ausgelegt werden kann (Downsizing). Allerdings ist aufgrund der begrenzten Kapazität des elektrischen Energiespeichers eine Leistungsaddition nur für eine kurze Zeit möglich, sodass für längere Fahrten mit hoher Leistungsanforderung (z.B. Fahrt zur Deponie) eine ausreichende Leistung des Verbrennungsmotors notwendig ist. Für das hybride Abfallsammelfahrzeug wird daher der Verbrennungsmotor des konventionellen Sammelfahrzeugs verwendet.

### **Elektrischer Antrieb**

Bei der Bemessung des elektrischen Antriebs (bestehend aus elektrischer Maschine und zugehöriger Leistungselektronik) sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen.

Für den elektrischen Betrieb des Pressmüllaufbaus ist eine mittlere Leistung von mindestens 22 kW erforderlich (s. Tabelle 1).

Die für die Rekuperation vorzuhaltende Bemessungsleistung kann näherungsweise aus der Bremsleistung des konventionellen Sammelfahrzeugs bestimmt werden. Dazu wird jeweils ein Ausschnitt zweier unterschiedlicher Sammelzyklen betrachtet. Sammelzyklus A beschreibt einen Sammelvorgang in dicht besiedeltem Gebiet und ist gekennzeichnet durch lange Stopps und kurze Fahrten mit niedriger Geschwindigkeit. Sammelzyklus B beschreibt einen Sammelvorgang in einer ländlichen Region mit kurzen Stopps und längeren Fahrten mit mittlerer Geschwindigkeit. Aus den in Bild 4 und Bild 5 gegebenen Ausschnitten resultieren die in Bild 6 und Bild 7 dargestellten Bremsleistungen. Um die komplette Bremsleistung zu rekuperieren, ist für Ausschnitt B eine maximale Leistung von 630 kW erforderlich. Eine Auslegung auf diese selten auftretende Spitzenleistung ist allerdings nicht sinnvoll. Abgesehen von einigen Leistungsspitzen ist für die Rekuperation eine Leistung von 100 kW ausreichend.

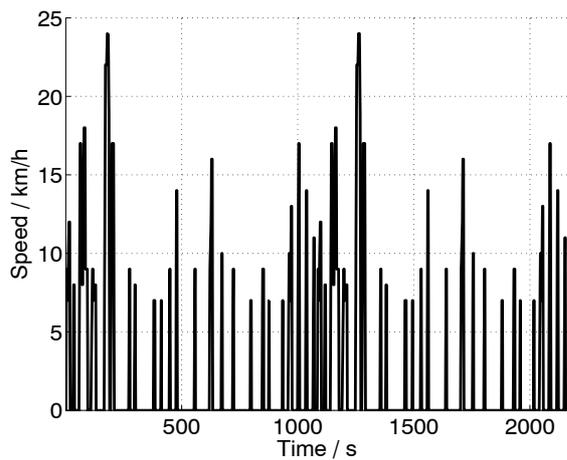


Bild 4: Ausschnitt Sammelzyklus A

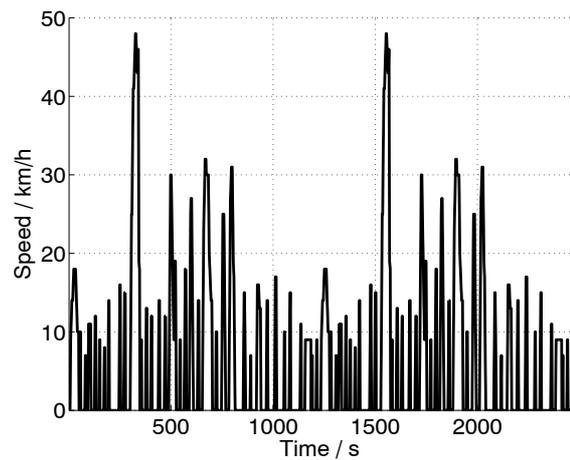


Bild 5: Ausschnitt Sammelzyklus B

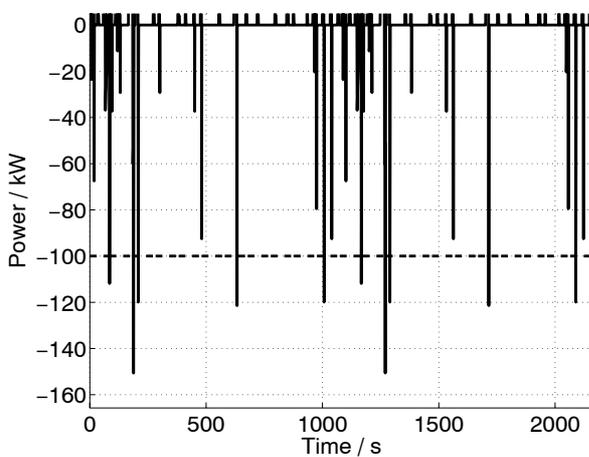


Bild 6: Bremsleistung für Ausschnitt A

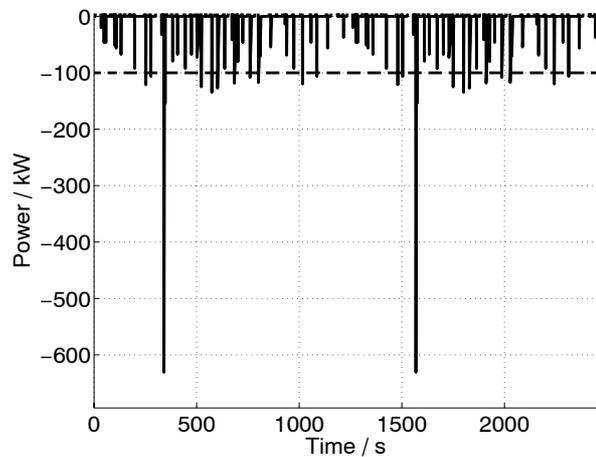


Bild 7: Bremsleistung für Ausschnitt B

In den Bildern 8 und 9 sind die Arbeitspunkte des Verbrennungsmotors, die sich beim konventionellen Sammelfahrzeug für die abgebildeten Ausschnitte der Sammelzyklen ergeben, dargestellt. Aus den Abbildungen wird deutlich, dass ein großer Teil der Arbeitspunkte im Bereich ungünstiger Wirkungsgrade des Verbrennungsmotors liegt. Die Verlagerung dieser Arbeitspunkte in Bereiche eines guten Wirkungsgrads erfordert eine Leistung von 50-60 kW. Mit dieser Leistung können die Arbeitspunkte wahlweise zu höheren Leistungen angehoben werden (Lastpunktanhebung), oder die Leistung kann rein elektrisch bereitgestellt werden (E-Fahrt).

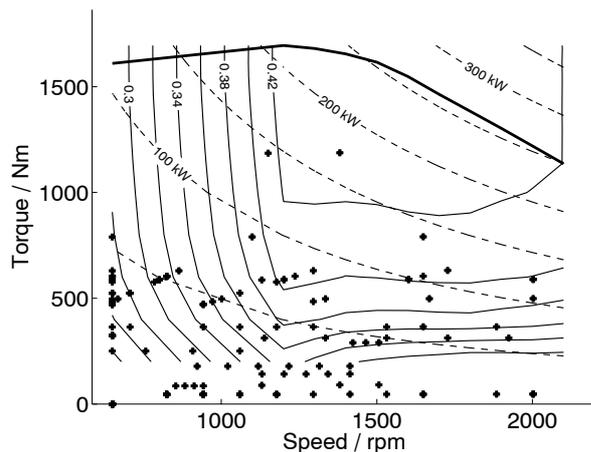


Bild 8: Arbeitspunkte des Verbrennungsmotors beim konventionellen Abfallsammel-fahrzeug für Ausschnitt A

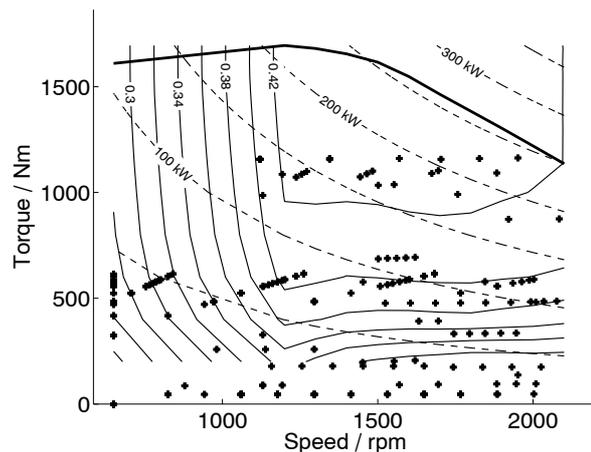


Bild 9 Arbeitspunkte des Verbrennungsmotors beim konventionellen Abfallsammel-fahrzeug für Ausschnitt B

Ausgehend von den dargestellten Überlegungen wird der elektrische Antrieb für eine Leistung von 100 kW bemessen. Da der Bauraum für die Integration in den Antriebsstrang begrenzt ist, soll aufgrund der vergleichsweise hohen volumetrischen Leistungsdichte als Motortyp ein Permanent-Magnet-Synchron-Motor (PMSM) eingesetzt werden. Die Daten des elektrischen Antriebs sind in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2: Daten des elektrischen Antriebs (Motor und Umrichter)<sup>2</sup>

Motortyp	PMSM
Bemessungsleistung	100 kW
Bemessungsdrehmoment	300 Nm
Gewicht Motor	86 kg
Gewicht Leistungselektronik	16 kg

### Elektrischer Energiespeicher

Neben der elektrischen Maschine ist für die hier verwendete parallele Hybridstruktur ein elektrischer Energiespeicher zwingend erforderlich. Für die Auslegung des Energiespeichers muss sowohl der zu speichernden Energie, als auch der erforderlichen Speicherleistung Rechnung getragen werden. Unter Vernachlässigung der elektrischen Nebenverbraucher ergibt sich die erforderliche Speicherleistung näherungsweise aus der Bemessungsleistung des elektrischen Antriebs zu 100 kW.

<sup>2</sup> Daten entnommen aus ADVISOR Stand 2002

Die zu speichernde Energie kann anhand der zu leistenden elektrischen Arbeit bestimmt werden. Wird der Pressmüllaufbau elektrisch betrieben und die dafür aus dem Speicher entnommene Energie durch Rekuperation und Nachladen mit dem Verbrennungsmotor ausgeglichen, ergeben sich für die elektrischen Arbeiten die in Bild 10 und Bild 11 dargestellten Verläufe (vom Speicher abgegebene Leistung wird positiv gezählt).

Daraus resultiert für den Ausschnitt A ein Speicherinhalt von 7,05 MJ und für Ausschnitt B von 0,98 MJ.

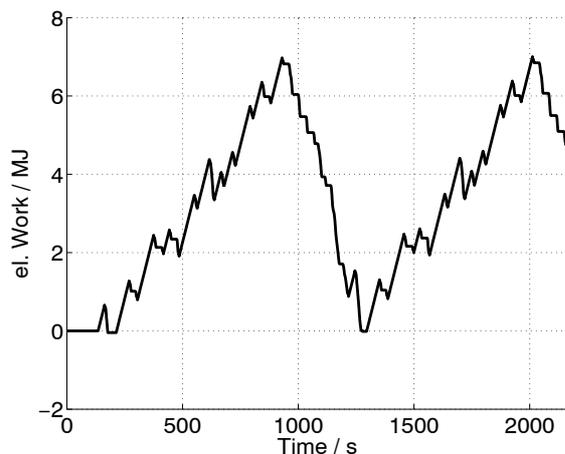


Bild 10: Geleistete elektrische Arbeit für Ausschnitt A

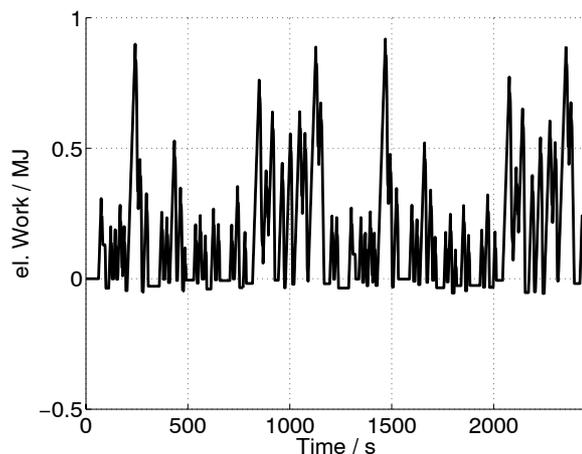


Bild 11: Geleistete elektrische Arbeit für Ausschnitt B

Als Energiespeicher kommen in einem hybriden Abfallsammelfahrzeug neben Batterien auch Doppelschichtkondensatoren (SuperCaps, BoostCaps) in Frage<sup>3</sup>. Aufgrund der technischen Reife werden aus der Gruppe der Batterien NiMH-Zellen betrachtet. Li-Ionen-Zellen weisen im Vergleich dazu zwar eine deutlich höhere Energiedichte und zyklische Lebensdauer auf, sind aber im Bereich von Fahrzeugen noch nicht sehr verbreitet.

Ausgehend von den in Tabelle 3 angegebenen Kenndaten ergeben sich die in Tabelle 4 dargestellten Speichermassen. Dabei ist zu beachten, dass die Batterie aufgrund ihres geringen Spannungshubs direkt mit dem Umrichter des Antriebs verbunden werden kann. Für die Anbindung der Doppelschichtkondensatoren ist dagegen zusätzliche Leistungselektronik erforderlich.

---

<sup>3</sup> Eine weitere Möglichkeit stellen Schwungräder dar, die Dank neuer Materialien zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Tabelle 3: Kenndaten einer NiMH Batteriezelle und eines Doppelschichtkondensators

Batteriezelle (NiMH)		Doppelschichtkondensator	
Nennkapazität	6,5 Ah (23,40 kAs)	Kapazität	2600 F
Leerlaufspannung <sup>4</sup>	1,29 V	Max. Spannung	2,5 V
Innenwiderstand <sup>4</sup>	4,58 mΩ	Innenwiderstand	0,7 mΩ
Max. Entladestrom	32,5 A	Max. Strom	600 A
Max. Ladestrom	6,5 A		
Gewicht	0,170 kg	Gewicht	0,360 kg
Energieinhalt (brutto)	30,29 kJ	Energieinhalt (brutto)	8,13 kJ
Energieinhalt (netto) <sup>5</sup>	6,06 kJ	Energieinhalt (netto) <sup>6</sup>	6,09 kJ
Leistung (entladen)	37,24 W	Leistung (entladen)	1.248 W
Leistung (laden)	8,61 W	Leistung (laden)	1.752 W

Tabelle 4: Erforderliche Speichermasse (Maximalwerte sind grau hinterlegt)

	Ausschnitt A Bemessung nach		Ausschnitt B Bemessung nach	
	Energie	Leistung	Energie	Leistung
NiMH-Batterie	197,54 kg	1.774,97 kg	27,03 kg	1.774,97 kg
Doppelschichtkondensatoren	415,80 kg	26,28 kg	56,88 kg	26,28 kg

Für die Batterie ergibt sich eine erforderliche Speichermasse von 1.775 kg und für die Doppelschichtkondensatoren von 416 kg. Aufgrund des geringeren Gewichts und der zu erwartenden längeren Lebensdauer werden Doppelschichtkondensatoren als Speicher verwendet. Ausgehend von einer DC-Systemspannung von 300 V ergeben sich für den Energiespeicher die in Tabelle 5 angegebenen Daten.

<sup>4</sup> Abhängig vom Ladegrad der Batterie. Wird hier als konstant angenommen, da die Batterie nur in einem eingeschränkten Ladegradbereich betrieben wird.

<sup>5</sup> Um die erforderliche zyklische Lebensdauer der Batterie zu erreichen, wird diese in einem Ladegradbereich von 60%-80% bezogen auf die Nennladung betrieben.

<sup>6</sup> Um den Spannungshub des Kondensators zu begrenzen, wird dieser nur bis auf 50% seiner maximalen Spannung entladen.

Tabelle 5: Daten des elektrischen Energiespeichers

Speichertechnologie	Doppelschichtkondensator
Anzahl Kondensatoren (davon in Reihe)	1.200 (120)
Kapazität	217 F
Max. Spannung	300 V
Innenwiderstand	8,4 mΩ
Energieinhalt brutto / netto	9,75 MJ / 7,31 MJ (2,71 kWh / 2,03 kWh)
Gewicht	432 kg

### 3.3 Betriebsstrategie

Bei der Struktur des hybriden Antriebsstrangs (s. Bild 3) kann die geforderte Leistung durch den Verbrennungsmotor, den elektrischen Antrieb oder durch eine Kombination aus beiden bereitgestellt werden. Damit ergeben sich für das hybride Abfallsammelfahrzeug die in Tabelle 6 zusammengefassten Betriebszustände.

Tabelle 6: Betriebszustände des hybriden Abfallsammelfahrzeugs

#	Betriebszustand	Beschreibung
1	E-Fahrt	Antriebsleistung wird vom elektrischen Antrieb bereitgestellt.
2	VM-Fahrt	Antriebsleistung wird vom Verbrennungsmotor bereitgestellt.
3	Boost	Antriebsleistung wird vom Verbrennungsmotor und vom elektrischen Antrieb bereitgestellt.
4	Nachladen	Verbrennungsmotor stellt neben der Antriebsleistung zusätzliche Leistung zum Nachladen des Energiespeichers bereit.
5	Rekuperation	Bremsleistung wird durch den elektrischen Antrieb bereitgestellt.
6	konv. Bremsen	Bremsleistung wird konventionell bereitgestellt.
7	E-Pressen	Leistung des Pressmüllaufbaus wird vom elektrischen Antrieb bereitgestellt.
8	VM-Pressen	Leistung des Pressmüllaufbaus wird vom Verbrennungsmotor bereitgestellt.

Die Übergänge zwischen den einzelnen Zuständen erfolgen in Abhängigkeit der Drehzahl und des Drehmoments am Getriebeeingang, des Ladegrads des Energiespeichers und des Betriebszustands des Pressmüllaufbaus.

Die hier verwendete Betriebsstrategie basiert auf der in [3] vorgestellten „Electrical Assist“ Strategie. Ziel ist eine Minimierung des Verbrauchs. Unter Einhaltung der Betriebsgrenzen des Energiespeichers wird dazu:

- bei Unterschreiten einer Drehzahl- und Drehmomentgrenze am Getriebeeingang rein elektrisch gefahren (E-Fahrt)
- oberhalb der Drehzahl- und Drehmomentgrenze mit dem Verbrennungsmotor gefahren und zusätzlich der Energiespeicher geladen (Nachladen)
- bei hoher Leistungsanforderung die Antriebsleistung durch Verbrennungsmotor und elektrischen Antrieb bereitgestellt (Boost)
- beim Bremsen die anfallende Bremsleistung durch den elektrischen Antrieb rekuperiert (Rekuperation)
- die Leistung für den Pressmüllaufbau elektrisch bereitgestellt (E-Pressen)

#### **4 Simulationsmodell**

Um die mit dem hybriden Antriebsstrang möglichen Verbrauchseinsparungen zu beurteilen, wurde für das konventionelle und hybride Abfallsammelfahrzeug ein Simulationsmodell unter Matlab/Simulink entwickelt. Die Struktur des Modells basiert auf dem Prinzip der „Rückwärtssimulation“, bei der die Betriebszustände der einzelnen Komponenten in Abhängigkeit des Fahrspiels bestimmt werden. Das Simulationsmodell enthält die folgenden Komponenten:

- Ein Modell des Fahrspiels, um die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Leistung des Pressmüllaufbaus während der Sammelfahrt in festen Zeitintervallen (1 s) vorzugeben.
- Ein Fahrzeugmodell bestehend aus den verschiedenen Komponenten des Antriebsstrangs.
- Eine Betriebsstrategie zur Vorgabe der Betriebszustände beim hybriden Abfallsammelfahrzeug.

##### **4.1 Fahrspiel**

Für die Beurteilung der möglichen Verbrauchseinsparungen werden zwei unterschiedliche Fahrspiele betrachtet. Fahrspiel A (s. Bild 12) beschreibt einen Sammelvorgang in dicht besiedeltem Gebiet. Fahrspiel B (s. Bild 13) beschreibt einen Sammelvorgang in einer ländlichen Region. Die Fahrspiele setzen sich aus mehreren Abschnitten zusammen:

- Fahrt Depot-Sammelstelle: Das Fahrzeug ist während der Fahrt unbeladen.
- Sammelzyklus: Der Sammelzyklus besteht jeweils aus einer Aneinanderreihung eines Teilzyklus. Während des Sammelzyklus nimmt die Zuladung des Fahrzeugs linear zu.
- Fahrt Sammelstelle-Deponie: Das Fahrzeug ist während der Fahrt voll beladen.

Die einzelnen Abschnitte basieren auf Messdaten, die während einer Sammelfahrt aufgenommen wurden.

Der Pressmüllaufbau ist immer dann aktiv, wenn das Fahrzeug für mindestens 20 s hält. Die Fahrspiele finden jeweils in der Ebene statt.

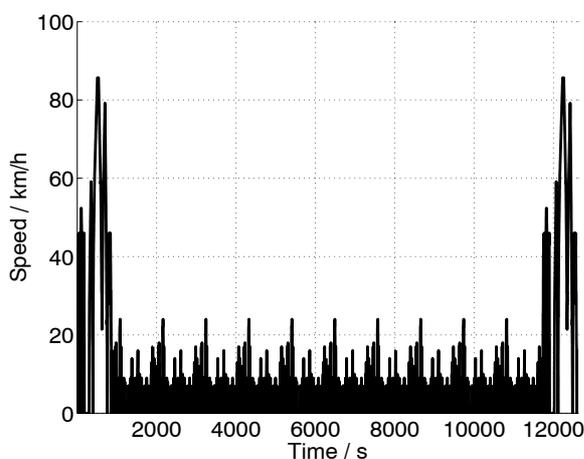


Bild 12: Fahrspiel A

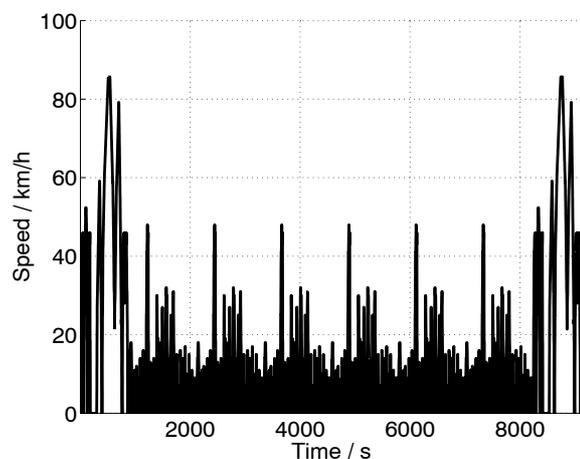


Bild 13: Fahrspiel B

## 4.2 Fahrzeugmodell

Das Fahrzeugmodell basiert auf den in Tabelle 1 angegebenen Daten. Differential und Getriebe werden als verlustfrei und trägheitslos angenommen. Für das hybride Sammelfahrzeug ergibt sich durch die zusätzlichen Komponenten ein Mehrgewicht von 534 kg.

### Verbrennungsmotor, elektrischer Antrieb

Die Modelle für den Verbrennungsmotor und den elektrischen Antrieb bestehen aus Kennfeldern (Look-Up Table), die dem Simulationswerkzeug ADVISOR2002 entnommen wurden (s. Tabelle 1 und Tabelle 2).

### Doppelschichtkondensator

Das Modell des Doppelschichtkondensators besteht aus einer Reihenschaltung eines idealen Kondensators mit einem Innenwiderstand (s. Tabelle 5).

## 5 Simulationsergebnisse

Bei der Auswertung der Simulationsergebnisse ist zu beachten, dass sich der Kraftstoffverbrauch des hybriden Sammelfahrzeugs aus dem Verbrauch des Verbrennungsmotors und dem Verbrauch der gespeicherten elektrischen Energie zusammensetzt. Aus der Letzteren kann unter der Annahme mittlerer Wirkungsgrade ein äquivalenter Kraftstoffverbrauch berechnet werden [3]. In Tabelle 7 und Tabelle 8 sind die Simulationsergebnisse dargestellt. Mit dem hybriden Abfallsammelfahrzeug ist für beide Fahrspiele eine deutliche Verbrauchersparnis im Bereich von 30% möglich. Neben der zu erwartenden Ersparnis während des Sammelzyklus können auch Verbrauchsvorteile während der Fahrten vom Depot und zur Deponie erreicht werden, die im Wesentlichen auf die Rekuperation der Bremsleistung zurückzuführen sind.

Tabelle 7: Simulationsergebnisse für das konventionelle Abfallsammelfahrzeug

	Fahrspiel A		Fahrspiel B	
	Verbrauch	Veränderung	Verbrauch	Veränderung
Komplettes Fahrspiel	7,76 l/h		8,77 l/h	
Depot-Sammelstelle	27,70 l/100km		27,70 l/100km	
Sammelzyklus	6,94 l/h		7,98 l/h	
Sammelstelle-Deponie	38,58 l/100km		38,58 l/100km	

Tabelle 8: Simulationsergebnisse für das hybride Abfallsammelfahrzeug

	Fahrspiel A		Fahrspiel B	
	Verbrauch	Veränderung	Verbrauch	Veränderung
Komplettes Fahrspiel	5,44 l/h	- 29,90%	5,73 l/h	- 34,66 %
Depot-Sammelstelle	19,69 l/100km	- 28,92%	19,69 l/100km	- 28,92%
Sammelzyklus	4,80 l/h	- 30,84%	4,97 l/h	- 37,72%
Sammelstelle-Deponie	28,96 l/100km	- 24,94%	28,96 l/100km	- 24,94%

## 6 Wirtschaftliche Betrachtungen

Durch die zusätzlichen Komponenten ist ein hybrides Abfallsammelfahrzeug teurer als ein vergleichbares konventionelles Sammelfahrzeug. Diesen Mehrkosten stehen Kostenersparnisse durch eine Verbrauchsreduzierung gegenüber. Anhand eines vereinfachten Kostenmodells sollen die Mehrkosten den zur erwartenden Einsparungen gegenübergestellt werden.

## 6.1 Systemkosten

Die Kosten für die zusätzlichen Komponenten des Antriebsstrangs hängen wesentlich von der Stückzahl ab. Insbesondere beim elektrischen Antrieb können die Kosten einer Einzelanfertigung die Kosten für ein Serienprodukt deutlich übersteigen. In Tabelle 9 sind jeweils die Kosten einer Einzelanfertigung und einer Kleinserie angegeben. Die Werte basieren auf den Angaben in [2].

Tabelle 9: Systemkosten

Komponente	Beschreibung	Preis Prototyp [US\$]	Preis Kleinserie [US\$]
Elektrische Maschine	100 kW, PMSM	10.000	5.850
Umrichter Antrieb		4.700	2.350
Getriebe für elektrischen Antrieb	Einstufig	1.000	800
Doppelschichtkondensatoren	1.200 Zellen	80.000	40.000
DC-DC Steller		2.350	1.175
Steuerung		2.000	1.000
elektrische Verbindungen		2.000	1.000
Verschiedenes		2.000	1.000
Summe		104.050	53.175

## 6.2 Wartungskosten

Die dem hybriden Antriebsstrang zusätzlich hinzugefügten elektrischen Komponenten sind wartungsarm, sodass im Vergleich zu einem konventionellen Sammelfahrzeug keine zusätzlichen Wartungskosten entstehen. Da das hybride Fahrzeug einen Großteil der Bremsleistung rekuperiert, unterliegen die Bremsen einem geringeren Verschleiß. Nach [2] führt dies zu einer jährlichen Ersparnis von 1.000 US\$.

## 6.3 Einsparungen während des Betriebs

Die Einsparungen im Betrieb resultieren im Wesentlichen aus den Verbrauchseinsparungen. Für deren Berechnung wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Es werden nur die Sammelzyklen berücksichtigt. Mögliche Einsparungen, die sich während der Transferfahrten (Depot, Deponie) ergeben, werden nicht betrachtet.
- An einem Tag können zwei komplette Sammelzyklen absolviert werden. Das Fahrzeug wird an 260 Tagen im Jahr eingesetzt.
- Der Preis für einen Liter Dieseldieselkraftstoff beträgt 1,40 US\$/l (1,10 €/l).

Mit den Annahmen ergeben sich die in Tabelle 10 dargestellten Einsparungen.

Tabelle 10: Verbrauchseinsparungen

	Sammelzyklus A	Sammelzyklus B
Einsparung pro Zyklus	6,42 l	6,17 l
Ersparnis pro Tag (2 Zyklen)	12,84 l	12,33 l
Ersparnis pro Jahr (260 Arbeitstage)	3.338 l	3.207 l
Kraftstoffpreis	1,40 US\$/l	1,40 US\$/l
Verbrauchseinsparung pro Jahr	4.673 US\$	4.489 US\$

#### 6.4 Bilanz

Werden die jährlichen Einsparungen den Systemmehrkosten gegenübergestellt, ergeben sich für die Amortisation der Zusatzkosten die in Tabelle 11 dargestellten Zeiträume. Nicht berücksichtigt sind Entwicklungskosten und Mehrkosten durch die Montage der zusätzlichen Komponenten. Bei einer mittleren Lebensdauer eines Sammelfahrzeugs von 8 Jahren ist bei den aktuellen Rahmenbedingungen (Komponentenpreise, Kraftstoffpreise, politische Vorgaben) das hier entworfene hybride Abfallsammelfahrzeug nicht wirtschaftlich.

Tabelle 11: Amortisationszeiträume (Dieselpreis 1,40 US\$/l)

	Prototyp		Kleinserie	
	Zyklus A	Zyklus B	Zyklus A	Zyklus B
Systemmehrkosten	104.050 US\$		53.175 US\$	
Jährliche Verbrauchersparnis	4.673 US\$	4.489 US\$	4.673 US\$	4.489 US\$
Jährliche Wartungersparnis	1.000 US\$		1.000 US\$	
Amortisation	18 Jahre	19 Jahre	9 Jahre	10 Jahre

Da der größte Teil der Systemkosten durch den elektrischen Energiespeicher verursacht wird, stellt sich die Frage, ob mit einem kleineren Speicher ein hybrides Sammelfahrzeug wirtschaftlich darstellbar ist. In Bild 14 ist erkennbar, dass sich für eine Kleinserie die Mehrkosten innerhalb der Lebensdauer von 8 Jahren amortisieren, wenn die Speichergröße kleiner 7,5 MJ ist. Steht die Minimierung des Verbrauchs im Vordergrund, ergibt sich aus Bild 15 eine optimale Speichergröße im Bereich von 5 MJ. Allerdings ist mit dieser Speichergröße der rein elektrische Betrieb des Pressmüllaufbaus während des Sammelzyklus nicht mehr möglich.

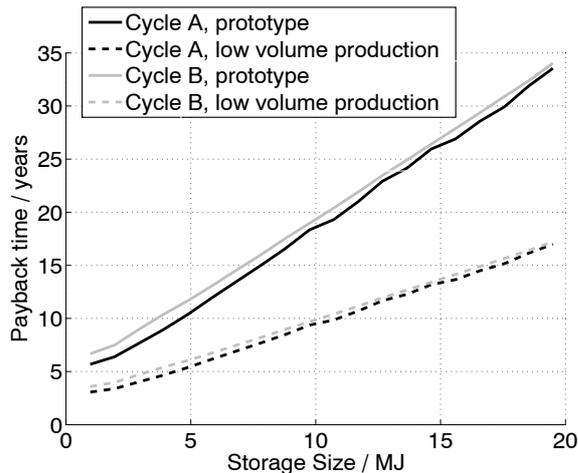


Bild 14: Amortisationszeitraum in Abhängigkeit der Speichergröße

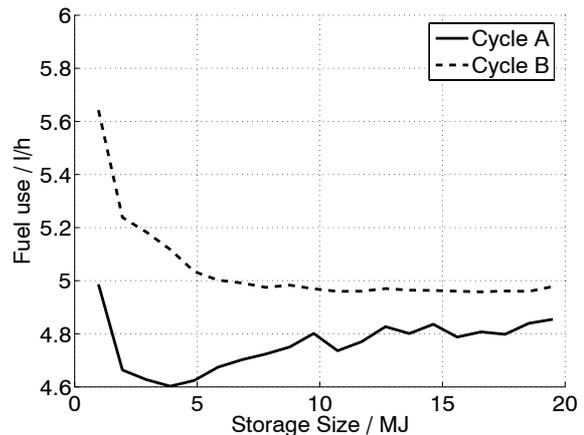


Bild 15: Verbrauch in Abhängigkeit der Speichergröße

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund des besonderen Fahrspiels eines Abfallsammelfahrzeugs lässt sich mit dem hier vorgestellten hybriden Sammelfahrzeug eine Verbrauchersparnis im Bereich von 30% erzielen. Der Verbrauchersparnis stehen hohe Mehrkosten, insbesondere für den elektrischen Energiespeicher, gegenüber. Unter wirtschaftlichen Aspekten ist eine Speichergröße im Bereich von 5 MJ sinnvoll, mit der aber ein rein elektrischer Betrieb des Pressmüllaufbaus während des Sammelzyklus nicht möglich ist.

Durch Stückzahleffekte ist für die benötigten Komponenten (elektrischer Antrieb, Energiespeicher) mit deutlich sinkenden Kosten zu rechnen. Nach [2] wird bis 2010 eine Reduzierung der Kosten für den Energiespeicher um mehr als 50% erwartet. Zusammen mit steigenden Treibstoffkosten kann für die Zukunft von deutlich kürzeren Amortisationszeiträumen ausgegangen werden, sodass hybride Abfallsammelfahrzeuge auch unter wirtschaftlichen Aspekten eine interessante Alternative darstellen.

[1] „CLEANOWA – electric-hybrid technology for more environment-friendly waste collection“, Report, Renova AB, Göteborg (Sweden) 2006 (EU Environment Fund “Life” No. LIFE 03 ENV /S/000592)

[2] „Hybrid Refuse Truck Feasibility Study“, Report, VePower Technologies, Vancouver (Canada) 2005 (Transport Canada Publication No. TP 14431E)

[3] Guzzella L., Sciarretta A., „Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization.“, Springer, 2005.