

SCHWUNGRADHYBRIDE ALS MÖGLICHE ALTERNATIVE FÜR DEN URBANEN INDIVIDUAL- UND NAHVERKEHR

Michael BADER¹, Armin BUCHROITHNER¹, Ivan ANDRASEC¹, Andreas BRANDSTÄTTER¹

Kurzfassung: Die aktuelle Verkehrs- und Umweltsituation bedingt eine dringende Notwendigkeit zur Entwicklung des Verkehrssektors in zwei Zielrichtungen: eine allgemeine Effizienzsteigerung der Fahrzeuge und eine Reduktion der Emissionen in urbanen Gebieten. Eine Fahrzeughybridisierung kann als Zwischenschritt zum rein elektrischen *Zero Emission Vehicle* angesehen werden und bietet eine Übergangstechnologie mit hohem Potential, guter Zuverlässigkeit und hoher Kundenakzeptanz.

Nach einer detaillierten Analyse der aktuellen Situation wird in dieser Publikation gezeigt, dass der Einsatz von Hybridfahrzeugen im Allgemeinen und von Fahrzeugen mit Schwungradspeichern im Speziellen, besonders im öffentlichen Nahverkehr und bei Fahrzeugflotten im innerstädtischen Betrieb zielführend ist.

Keywords: Schwungrad, Schwungradspeicher, Flywheel, Hybridfahrzeug, Rekuperation

1 Allgemeine Situationsbeschreibung

Seit der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts kann ein stark steigendes Verkehrsaufkommen beobachtet werden. Der Verkehrssektor ist der am schnellsten wachsende Energieverbraucher und Erzeuger von Treibhausgasen in der EU [1]. In Abbildung 1 ist der Anstieg des Kfz-Bestandes dargestellt. Dieser Anstieg, auch bedingt durch das Verlangen der Menschen einen hohen Mobilitätsgrad zu erreichen, wirkt sich besonders in den urbanen Regionen unserer Erde spürbar negativ auf die Lebensqualität aus. Nicht nur befinden sich neben der Mehrzahl der Fahrzeuge noch etliche andere Emissionsquellen in oder nahe Ballungszentren, sondern die Ballungszentren an sich

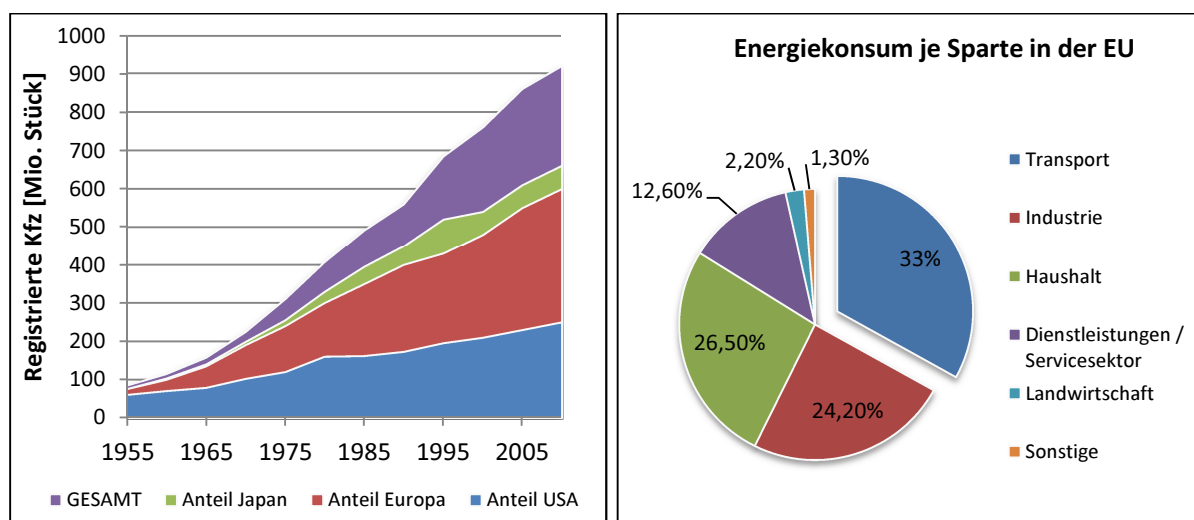


Abbildung 1: Anzahl der registrierten Kfz [2] Abbildung 2: Energiekonsum je Sparte in der EU [3]

¹Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik, TU Graz, Inffeldgasse 21b/II, 8010 Graz, Austria, Telefonnr.: +43 (316) 873 - 7366, armin.buchroithner@tugraz.at, <http://www.meem.tugraz.at>

Werden durch das Zusammenwachsen vieler Städte immer mehr, wodurch sich ein hoher Prozentsatz des gesamten Verkehrs zwangsläufig innerstädtisch abspielt.

Seit dem Jahr 1946 hat sich der Kfz-Bestand jährlich um 10% erhöht und konsequenter Weise ist auch der Energiebedarf im Mobilitätssektor trotz immer effizienter werdender Fahrzeuge drastisch angestiegen. Die aktuellsten von der Europäischen Kommission offengelegten Zahlen aus dem Jahr 2009 zeigen, dass das Transportwesen für ein Drittel des Energiekonsums der 27 EU-Länder – welcher 1703 Mio. Tonnen Öläquivalent beträgt – verantwortlich ist (Abbildung 2). Diese 33% lassen sich wieder nach Transportmodus unterteilen und es stellt sich heraus, dass der Straßenverkehr 83% der gesamten Energie im Verkehrswesen konsumiert. Um konkrete Zahlen zu nennen: Das sind 367,6 Mio. Tonnen Öläquivalent oder $42,7 \times 10^{11}$ kWh. Betrachtet man die daraus resultierenden Emissionen von Treibhausgasen, so ergibt sich aufgrund der Masseerhaltung eine ähnlich alarmierende Bilanz, wobei der Straßenverkehr hier sogar 93,4 % im Transportsektor verursacht.

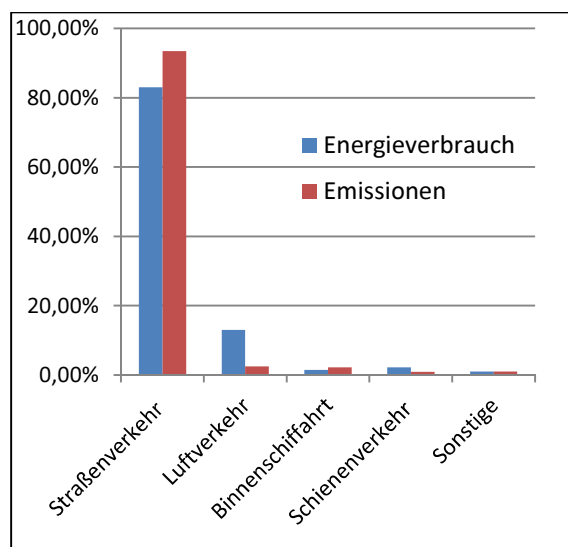


Abbildung 3: Energiekonsum und Emissionen je Transportmittel im Transportwesen der EU [3]

Das Szenario in der EU ist repräsentativ für ein weltweites Problem: Die Emissionen steigen proportional zum Energiebedarf auf globaler Ebene, obwohl es die moderne Abgasnachbehandlung ermöglicht, zumindest den Ausstoß von NO_x , HC und CO einzudämmen. Der Personen- und Nahverkehr ist jedoch für einen Großteil der *lokalen Emissionen* in Ballungszentren verantwortlich, welche für die Bevölkerung besonders stark zu spüren sind. Dieser Umstand hat die Thematik auch zu einer politischen Debatte gemacht und in etlichen Städten wurde bereits eine City-Maut für VKM-betriebene Fahrzeuge eingeführt oder ein totales Fahrverbot für mit fossilem Brennstoff betriebene Fahrzeuge verhängt.

Im Kreuzfeuer der Kritik stehen nicht nur Dieselfahrzeuge, welche aufgrund ihrer Partikelemissionen in manchen Regionen eine Feinstaubdebatte ausgelöst haben, sondern neuerdings auch Fahrzeuge mit direkteinspritzendem Ottomotor [4].

Es existiert also ganz offensichtlich die Notwendigkeit für den lokal emissionsfreien Betrieb von Fahrzeugen für den innerstädtischen Einsatz. Dieses Ziel muss nicht zwangsläufig durch Elektrofahrzeuge erreicht werden, sondern auch Hybridfahrzeuge können eine zufriedenstellende Lösung des Problems unter Einsatz bereits bestehender Technologien darstellen.

2 Mögliche Vorteile der Hybridisierung gegenüber Elektrifizierung

Oder: warum nicht gleich vollständiger Umstieg zur E-Mobility?

Oft propagieren politische Entscheidungsträger Lösungen, welche aus technischer Sicht zum aktuellen Zeitpunkt nicht optimal sind. Obwohl die von der EU ins Leben gerufene europäische *Green Car Initiative* [5] die vollständige Elektrifizierung des Individualverkehrs als erstrebenswertes Ziel erklärt hat, ist fraglich, ob der gewählte

Weg auch zu eben diesem Ziel führen wird. Der Schwerpunkt der Initiative liegt definitiv in der Herstellung und Vermarktung rein elektrischer Fahrzeuge, ungeachtet etlicher bislang ungelöster Probleme wie unter Punkt 2.1 beschrieben. Das von Seiten der EU-Administration gewünschte Szenario ist in Abbildung 4 dargestellt.

2.1 Aktuelle Herausforderungen im Bereich der Elektrofahrzeuge

Um die E-Mobility jedoch flächendeckend und für den Kunden zufriedenstellend einzuführen sind aktuell noch viele Probleme zu klären, welche besonders den PKW-Sektor betreffen. Einige wesentliche Problempunkte seien nun erläutert.

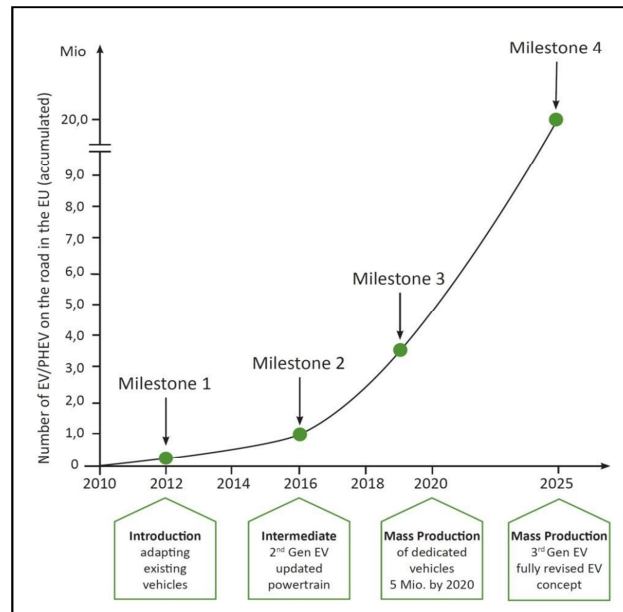


Abbildung 4: Meilensteine der „European Industry Roadmap for Electrification“ [6]

Reichweite: Die Reichweite eines Fahrzeuges sinkt mit zunehmenden Fahrwiderständen (Luftwiderstand, Rollreibung) und steigt mit dem Energieinhalt des primären Speichers (Tank, Batterie, etc). Da eine *signifikante* Reduktion der Fahrwiderstände kaum mehr möglich erscheint und ein Energiebedarf von etwa 140 Wh / (km * to) angenommen werden kann [7], wird das Reichweitendilemma der Elektrofahrzeuge zu einem Problem der Batterietechnik. Dieser Effekt wird auch durch das hohe Gewicht der Fahrzeugbatterien verstärkt, da mit diesem die Rollreibung und Massekräfte steigen. Die meist üblichen Energieinhalte von rund 30 kWh [8] erlauben somit nominelle Reichweiten von etwa 150 bis 200 km. Diese Betrachtungsweise vernachlässigt jedoch den Energiebedarf der Nebenaggregate (elektrische Heizung), erhöhte Fahrwiderstände durch Winterreifen, Schnee, Matsch etc. Der Reichweitenunterschied zwischen Sommer- und Winterbetrieb eines *ECE VW Golf Variant* wurde in [9] untersucht, wobei bei 15°C Umgebungstemperatur auf Grundlage des NEDC (*New European Driving Cycle*) eine Reichweite von 179 km und bei -5 °C lediglich 81 km erreicht wurde.

Abbildung 5 zeigt die signifikante Abnahme der Reichweite bei Zuschaltung einer elektrischen Heizung ($P_{aux} = 3,5 \text{ kW}$) und bei großen Reisegeschwindigkeiten. Ein derartiger Performanceeinbruch während der Wintermonate würde vermutlich speziell von Kunden in Mitteleuropa und Nordamerika als inakzeptable angesehen werden. Ein Lösungsansatz liegt in der Optimierung des Thermomanagements der Fahrzeuge sowie der Einführung neuer Arbeitsprinzipien für effizientere Nebenaggregate (Electronic Wedge Break, Electric Power Steering, Wärmepumpe für Fahrzeugheizung etc.) Studien haben gezeigt, dass die Kunden den Kauf eines Elektrofahrzeuges erst ab einer Reichweite von 300 bis 400 km in Erwägung ziehen [10].

Batterie: Neue Batteriekonzepte wie die *Lithium-Luft-Batterie* verfügen über das Potential eines zehnfach höheren Energieinhalts als heutige *Lithium-Ionen-Batterien* und könnten in Zukunft die oben erwähnte Reichweitenproblematik eliminieren [11]. Aber abgesehen davon gibt es einige weitere ungelöste Probleme, die den gesamten Lebenszyklus der Batterie betreffen.

1. *Herstellung*: Zurzeit steht der hohe Preis des Batterypacks, der bis zu mehr als 50% [12] der gesamten Fahrzeugkosten betragen kann einer Konkurrenzfähigkeit zu herkömmlichen Pkws im Wege [13]. Zwar würde eine Erhöhung der Stückzahlen eine theoretische Kostenreduktion um bis zu 50% mit sich bringen [14], würde aber in der Praxis auch eine Ressourcenverknappung bedingen [15]. Zwanzig Millionen Elektrofahrzeuge, wie Milestone 4 in Abbildung 4 für das Jahr 2025 prognostiziert, benötigen 1 Million Tonnen Elektrodenmaterial [16].

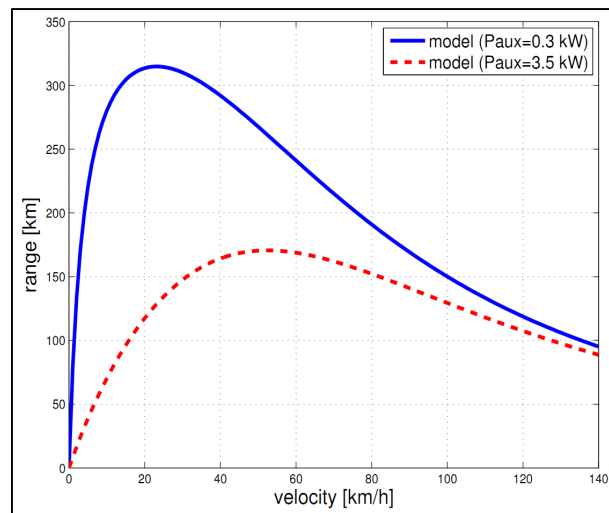


Abbildung 5: Reichweite eines ECE VW Golf Variant [9]

2. *Wartung und Betrieb*: Die Lebensdauer von Batterien hängt im Wesentlichen von den Belastungszyklen ab. Hohe Ströme und kurze Ladezeiten verkürzen die Lebensdauer, welche sich in der Regel zwischen 5 und 10 Jahren², oder 1000 bis 5000 Ladezyklen [17] bewegt. Dieser Umstand könnte speziell im Gebrauchtwagenmarkt problematisch sein, während im Segment der Neuwagen noch immer ungeklärt ist, wer schlussendlich für die Garantie der Batterypacks verantwortlich ist. Auch einige Sicherheitsfragen wie z.B. die Brennbarkeit von Batterien sind noch Teil aktueller Forschungsarbeit [15].
3. *Entsorgung*: Aus umwelttechnischer Sicht stellt sich in erster Linie die Frage: Wer der sechs Beteiligten (Batteriehersteller, Batterieimporteuer, Fahrzeughersteller, Fahrzeugimporteuer, Fahrzeugverkäufer und End-User) ist für die Entsorgung verantwortlich? Dieses Problem ist zwar teils für portable Batterien gelöst³, aber es besteht nach wie vor die Notwendigkeit der Entwicklung eines Rücknahme und Recyclingsystems für Fahrzeugbatterien [18].

Infrastruktur für Elektrofahrzeuge: Auch hier sind noch einige Entwicklungen und Entscheidungen von Nöten, die auf den ersten Blick recht trivial erscheinen. Ein Netz von Schnellladestationen oder *Battery-Swapping-Anlagen* muss aufgebaut werden, Normen für Ladestecker müssen kreiert und beschlossen werden, sowie das gesamte Konzept eines intelligenten Stromnetzes – dem sogenannten *Smart Grid* – unter Einbeziehung der Elektrofahrzeuge als Kurzzeitstromspeicher - muss weiterentwickelt werden [19].

Aktuell gilt das Elektroauto als teures Zweitauto für den gelegentlichen innerstädtischen oder den Betrieb nahe Ballungszentren, da sowohl Infrastruktur als auch die Reichweite für Überlandfahrten ungenügend sind. In diesem Falle wird eine energetische Amortisation nur schwer zu erreichen sein und die Umweltbelastung ist – abhängig von der Nutzungsintensität des E-Fahrzeuges – möglicherweise sogar größer als bei einem Haushalt mit nur einem herkömmlichen Dieselfahrzeug. Auch die finanzielle Amortisation würde aufgrund der hohen Anschaffungskosten und der dafür geringen variablen Kosten nur bei einer hohen Kilometerleistung erfolgen, für die die Fahrzeuge aufgrund der geringen Reichweite aber noch nicht geeignet sind.

² Nach 10 Jahren kann die Kapazität um bis zu 40% absinken [23].

³ Firmen wie *BEBAT* (Belgien), *STIBAT* (Holland) oder *GRS* bzw. *CCR* (Deutschland) übernehmen diese Aufgabe.

2.2 Hybridisierung als Zwischenschritt auf dem Weg zur E-Mobility

Ohne Zweifel kann das „Zero Emission Vehicle“ (ZEV) als ein langfristiges Ziel der Automobilhersteller angesehen werden, aber der Hybridtechnologie als Konkurrent müssen aktuell folgende Eigenschaften zugutegehalten werden:

- Hybridfahrzeuge ermöglichen es, die Vorteile von etablierten Technologien mit neuen zukunftssträchtigen Entwicklungen zu kombinieren und generieren somit einen potentiellen Mehrwert unter Aufrechterhaltung *hoher Zuverlässigkeit*. Dabei bieten sie ein reales Versuchsfeld um Neuentwicklungen im Bereich der elektrischen Antriebstechnik zu testen.
- Abhängig vom Primärenergiemix - wie in Abbildung 6 - führt eine Fahrzeugelektrifizierung nur zu einer Emissionsverlagerung und nicht notwendigerweise zu einer Emissionsverringerung bzw. Energieeinsparung. Geht es nur darum, die Emissionen aus den Ballungszentren zu bringen, so kann dies auch durch Hybridfahrzeuge geschehen, welche über die Möglichkeit einer emissionsfreien Fahrt im innerstädtischen Bereich verfügen können. All dies ist bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung großer Reichweiten für den Überlandbetrieb machbar.
- Beschränkt verfügbare Materialien spielen keine so große Rolle wie im reinen Elektrofahrzeug (EV), da in einem Elektrohybrid geringere Mengen an Kathodenmaterial benötigt werden. Aber es existieren sogar Hybridkonzepte, welche sich fast ausschließlich auf Rohstoffe mit guter Verfügbarkeit stützen. Beispiele hierfür sind die in dieser Veröffentlichung diskutierten Schwungradspeicher oder Versuchskonzepte wie der Hydro- oder Druckluftspeicher [20], [21].

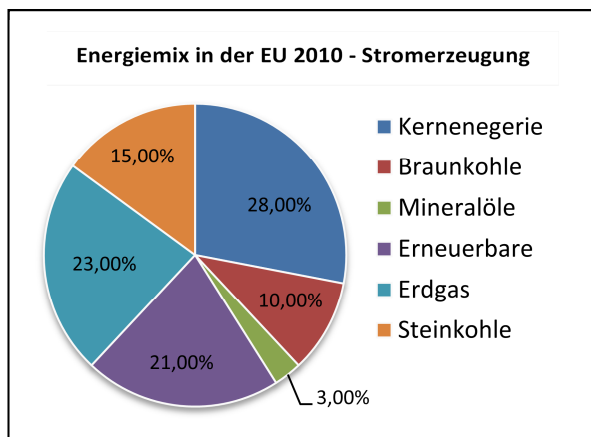


Abbildung 6: Energiemixe in der EU, 2010 [22]

Das hohe theoretische Potential von Elektrofahrzeugen bleibt unbestritten, aber speziell im Bereich der Energiespeicherung (Batterietechnik) ist noch F&E-Arbeit von Nöten. Handlungsbedarf ist aber schon jetzt gegeben und das rechtfertigt die Aussage: Es darf nicht bis zum Durchbruch in der Batterietechnik gewartet werden, sondern es muss schon jetzt unter *Ausnutzung der bestehenden Technologien* Initiative ergriffen werden.

3 Die besondere Eignung des Nahverkehrs für Hybridisierung

Praktische Erfahrung aus dem PKW-Sektor hat gezeigt: Hybridisierung bewirkt bei Stationärfahrt keine Verbrauchseinsparung da keine rekuperierbare Bremsenergie vorliegt, der Antriebsstrang jedoch schwerer wird. Ein PKW bewegt sich aber bis zu 70% seiner Laufleistung auf der Autobahn [2] und weist daher meist Fahrprofile auf, welche nur durch eine Optimierung der primären Leistungseinheit eine Verbrauchssenkung zulassen. Das theoretische Potential der vollkommenen VKM ist aber abhängig vom *Verdichtungsverhältnis* ϵ auf etwa 60% bei Diesel, bzw. 50 % bei Ottomotoren beschränkt.

3.1 Rekuperation als Maß für das Einsparungspotential

Es ist also naheliegend, dass das große Plus alternativer Antriebsstränge – und das betrifft sowohl das reine EV als auch diverse Hybride – die Bremsenergieerückgewinnung ist. Und diese kommt erst dann zum Tragen, wenn der Fahrzyklus dies auch zulässt. Abbildung 7 zeigt die Geschwindigkeits- und Leistungsprofile sowie die theoretisch rückgewinnbare Energie für einen Stadtzyklus. Es ist unschwer zu erkennen, dass der Leistungsfluss eine hochdynamische Charakteristik aufweist, während die durchschnittlich erforderliche Leistung für den Bus im Braunschweig-Zyklus lediglich 36 kW beträgt. Dies bedeutet, dass ein dynamischer Sekundärspeicher im hybriden Antriebsstrang ein *signifikantes Downsizing* sowie einen Bestpunktbetrieb der Verbrennungskraftmaschine erlaubt.

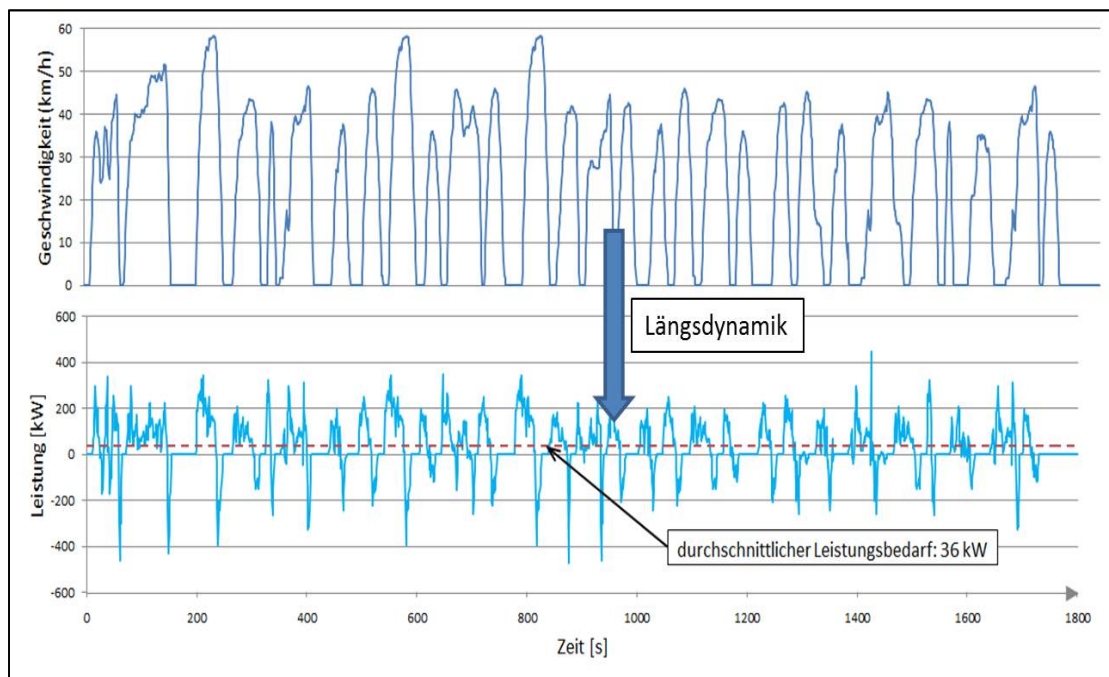


Abbildung 7: Geschwindigkeitsprofil und Leistungsbedarf eines 19t-Buses im Braunschweig-Zyklus

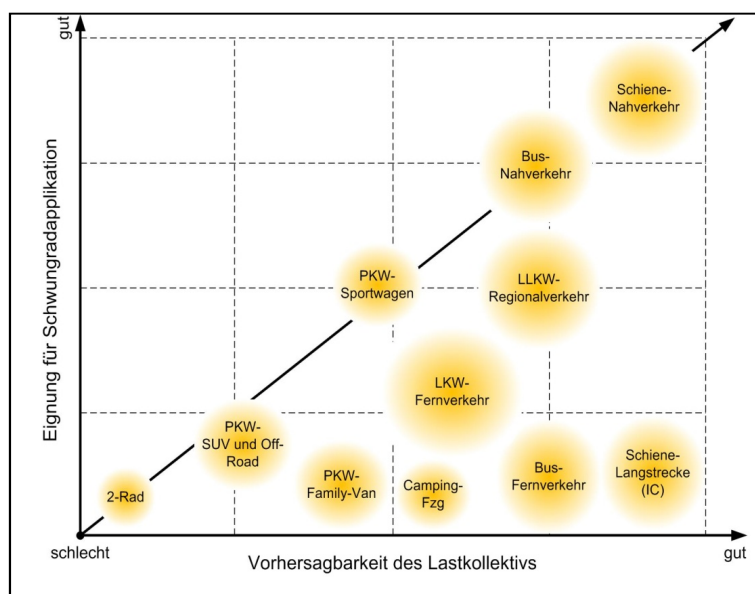


Abbildung 8: Zunahme der Eignung für die Schwungradhybridisierung über der Vorhersagbarkeit des Lastkollektivs (angenähertes, qualitatives Schaubild)

Abbildung 7 unterstreicht aber vor allem die Eignung von urbanen Fahrzyklen für die Rekuperation, was sowohl für den Pkw, als auch für Nutzfahrzeuge gilt. Der öffentliche Nahverkehr verfügt aber darüber hinaus noch über eine weitere Eigenschaft, welche die optimale Auslegung der sekundären Leistungseinheit sowie des sekundären Speichers im hybriden Antriebsstrang überhaupt erst ermöglicht: Es ist die *Vorhersagbarkeit* des Lastkollektivs, eine *notwendige* aber *keine hinreichende* Bedingung für die effektive Nutzbremung. Straßenbahnen und Buse halten sich meist an einen vorgegebenen Fahrplan und die Anzahl der Stopps, Standzeiten, sowie Beschleunigung- und Verzögerungswerte sind bekannt. Abbildung 8 gibt den Sachverhalt in einem qualitativen Schaubild wieder.

3.2 Weitere „Eigenschaften /Eignungen“ von Nahverkehrsfahrzeugen

Eine effektive Fahrweise ist für professionelle Fahrer „erlernbar“. Bei zu geringer Verzögerung wird die kinetische Energie des Fahrzeuges nur noch in Luft- und Rollreibung umgewandelt und geht somit verloren. Abbildung 9 stellt den Anteil der rückgewinnbaren kinetischen Energie in Abhängigkeit von der Bremsverzögerung bei $v_0 = 50$ km/h dar.

Es geht hervor, dass ein sanftes Ausrollen des Fahrzeuges einen schlechten Einfluss auf die Rekuperation der Bremsenergie hat und idealer Weise ein Verzögerungsbereich von 0,6 bis 1,2 m/s^2 eingehalten werden sollte. Diese Beschleunigungen sind für Passagiere keinesfalls unangenehm.

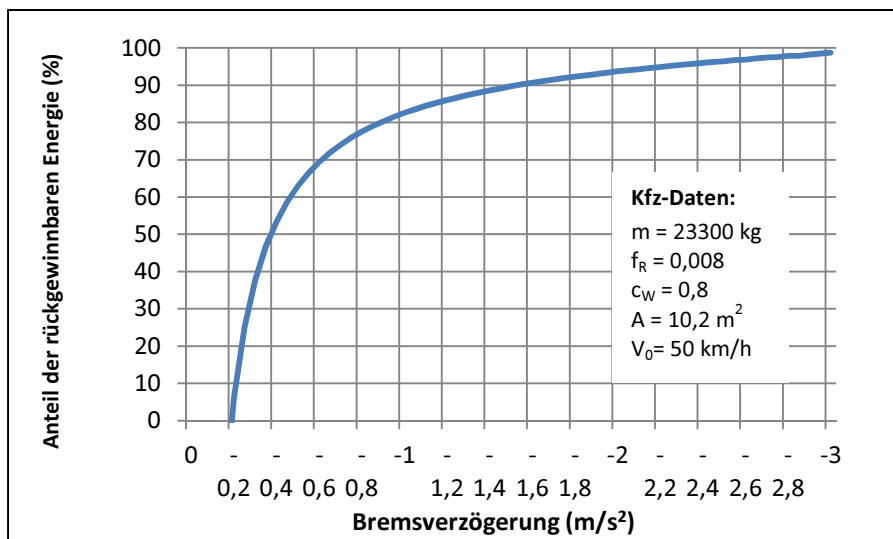


Abbildung 9: Rückgewinnbare kinetische Energie über Verzögerung bei einem Autobus

Wirtschaftlichkeit ist primäre Motivation bei der Anschaffung eines Fahrzeuges im Öffentlichen Verkehr. Durch den Dauereinsatz dieser Fahrzeuge kommt es zu kürzeren Amortisationszeiten der Mehrkosten für einen Schwungradspeicher.

Gewicht und Bauraum spielen zwar auch bei großen, kommerziell genutzten Fahrzeugen eine entscheidende Rolle, aber das Platzangebot kann generell betrachtet doch als großzügiger als bei den meisten PKWs angesehen werden.

Der öffentliche Nahverkehr steht oft im medialen Rampenlicht und verstand es seit jeher, sein „**grünes Image**“ durch das Etablieren neuer, umweltfreundlicher Technologien zu verbessern⁴ und somit eine Art Vorreiterrolle einzunehmen. Dadurch können Privatpersonen mit der neuen Technologie vertraut werden, ohne das Risiko eingehen zu müssen, diese selbst kaufen und testen zu müssen, wodurch der Markteintritt erleichtert werden könnte.

⁴ Vielerorts sind Wasserstoff-, Erdgas- oder elektrisch betriebene Busse sowie Hybridbusse im Einsatz.

4 Stand der Technik im Bereich kinetischer Energiespeicherung

Im Allgemeinen wird ein Energiespeicher immer über zwei wesentliche Eigenschaften charakterisiert: Seine *Energie-* und seine *Leistungsdichte*. Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, bieten Batterien generell höhere Energiedichten, während sowohl Flywheels als auch Supercaps hohe Leistungsdichten und damit eine gute Eignung für die Lastpunktverschiebung aufweisen. Der schematische Ausbau eines Schwungradhybrides ist in Abbildung 10 dargestellt.

Tabelle 1: Typische Kenndaten mobiler Energiespeicher ermittelt aus [7], [11], [24], [25], [26], [27]

Typische Kenndaten mobiler Energiespeicher					
		Aktuell			Zukunft
		Li-Io-Batterie (leistungsoptimiert)	Schwungrad	Supercap	Li-Luft Batterie
Gravimetrische Energiedichte	[Wh/kg]	200	10 bis 100	5 bis 10	5000
Gravimetrische Leistungsdichte	[W/kg]	700	1000 bis 6000	1500 bis 7000	100
Volumetrische Energiedichte	[Wh/l]	250	bis 60	5	300
Volumetrische Leistungsdichte	[W/l]	500	bis 7500	um 5000	3000 bis 4000

Die um den Faktor 10 höhere Energiedichte des Schwungrades verglichen zum Supercap macht dieses aber zu einem guten Kompromiss, wenn es nicht nur darum geht Lastspitzen abzudecken, sondern über kürzere Strecken auch emissionsfrei zu fahren. Bei Hybridfahrzeugen spielt der absolute Energieinhalt des elektrischen Speichers keine so große Rolle wie bei reinen Elektrofahrzeugen.

Vergleicht man den Schwungradspeicher mit üblichen Batterien, welche in Hybridfahrzeugen zum Einsatz kommen, so kann man folgende wesentliche Charakteristika herausgreifen:

- Hohe Lade- und Entladeleistungen schaden dem Speicher nicht! Dies gilt auch für eine Tiefentladung, welche im Falle der Batterie in einer Kapazitätsverminderung resultieren würde.
- Die maximale Leistung ist durch die E-Maschine oder die mechanische Energieübertragung limitiert und das Potential ist somit nach oben hin offen. Das demonstrieren auch erfolgreiche Rennsportanwendungen wie der *Porsche GT3 Hybrid* und unterschiedliche *KERS*-Konzepte in der Formel 1.
- Der Ladezustand (*State of Charge*) ist über die Drehzahl durch die Formel $E = \frac{1}{2} I \omega^2$ exakt bestimmbar, was bei Batterien nicht der Fall ist, wodurch die Abschätzung der Reichweite erschwert wird.
- Es tritt keine Alterung und Verringerung des Energieinhaltes auf. Die Lebensdauer sowie die Wartungsintervalle werden im Wesentlichen durch die Belastung der Lager bestimmt und sind um ein vielfaches höher als bei Batterien.

Einige Faktoren limitieren jedoch das theoretische Potential von Schwungrädern. Potentielle Lösungen führen meist zu einer Erhöhung der Systemkomplexität. Die wesentlichen Nachteile dieser Technologie seien nun genannt.

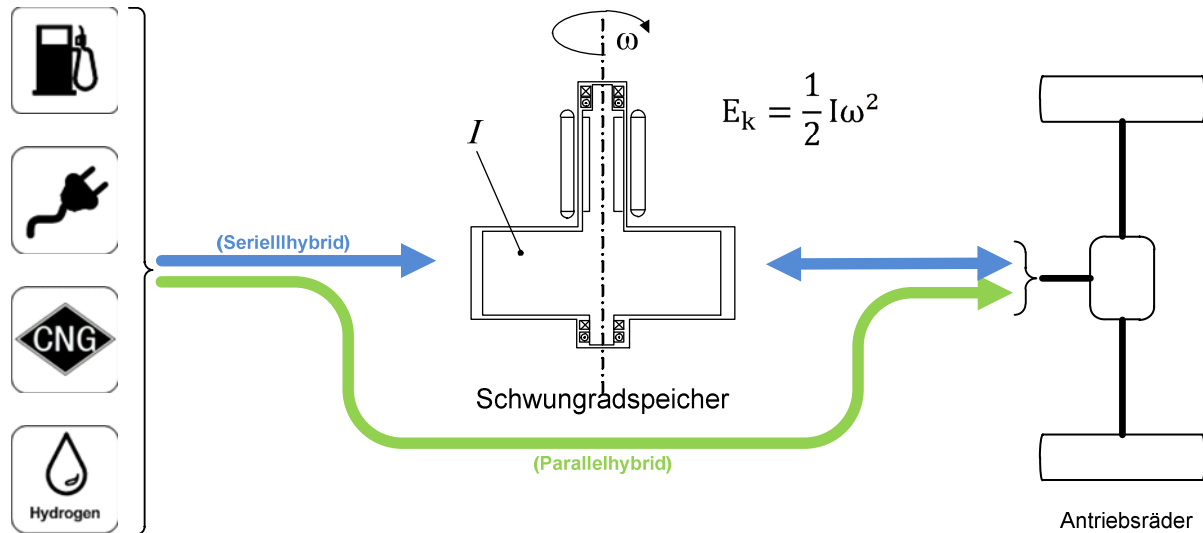


Abbildung 10: Schematischer Aufbau eines Schwungradhybrides mit unterschiedlichen Primärspeichern

- Schwungradspeicher haben eine sehr hohe Selbstentladung aufgrund hoher Verlustmomente. In erster Linie sind das Strömungsverluste und Lagerreibung. Diese können zwar durch Evakuierung der Laufkammer und den Einsatz von Magnetlagern deutlich reduziert werden, steigern aber Kosten, Gewicht und Bauraum. In hochdynamischen Fahrzyklen spielt die Selbstentladung aber eine untergeordnete Rolle.
- Bei jedem rotierenden Körper treten zwangsläufig gyroskopische Kräfte auf, welche in bewegten Systemen, wie in einem Fahrzeuge Lagerreaktionen hervorrufen.
- Im Schadensfall kann das Flywheel durch Bersten die gespeicherte Energie in Sekundenbruchteilen freisetzen. Dies gilt es natürlich zu vermeiden, wodurch eine gute Überwachungsstrategie und ein Sicherheitsgehäuse erforderlich sind.

5 Simulationstechnischer Vergleich der Energiespeicher im Nahverkehr

Um das Potential des Schwungradspeichers zu unterstreichen, wurde eine abschätzende Berechnung nach [28] durchgeführt. Die Simulation beruht auf der analytischen Beschreibung des Leistungsbedarfs während der Fahrt und wurde auf numerischem Wege für diskrete Fahrzustandspunkte eines Fahrzyklus angewendet.

$$P = m g v (f_r + K v^2) + \frac{1}{2} \rho_{luft} v^3 A c_w + m_a v \frac{d v}{d t}$$

Als virtuelle Teststrecke wurde der sogenannte „Braunschweig-Zyklus“ herangezogen, der die Längsdynamik im Nahverkehr wiedergibt ohne jedoch die geodätische Höhe zu berücksichtigen. Als Fahrzeug wurde ein Autobus mit einer Masse von 19 t gewählt. Solche Fahrzeuge werden fast ausschließlich in urbanen Gebieten betrieben und verdeutlichen durch das hohe Gewicht das Potential bei der Nutzbremmung sehr gut. Die Gestalt der Energiespeicher für die Bremsenergie-Rückgewinnung ist an [29] angelehnt. Die Eckdaten sind in Tabelle 2 angeführt.

Tabelle 2: Spezifikationen der Energiespeicher als Grundlage für die Simulation

	A: Schwungrad-Speicher	B: Akkumulator (Li-FePO4)	C: Supercap
Max. Energieinhalt kWh	1,5	8,3	1,5
Max. Leistung kW	165	120	144
Masse kg	165	170	150

Die Ergebnisse der Berechnung zeigen, dass der Schwungradspeicher bei der Energieeinsparung mit der jetzigen Batterietechnik und den Supercaps vergleichbar ist. Wichtig ist, dass alle hier betrachteten Speichersysteme leistungsoptimiert sind. Generell herrscht speziell bei Batterien eine Diskrepanz zwischen Leistungs- und Energieoptimierung. Selbst wenn neue Batteriekonzepte, wie die *Li-Luft-* oder *Zn-Luft-Batterie* das für die Zukunft prognostizierte theoretische Potential wie in [27] und Tabelle 1 beschrieben erreichen, so sind diese zwar für das reine Elektrofahrzeug interessant, bieten sich aber aufgrund ihrer geringen Leistungsdichte kaum für den Einsatz in schweren Hybridbussen an.

Dieses theoretische Potential ist derzeit aber noch Gegenstand der Forschung / Entwicklung und deshalb kann mit einer Markteinführung erst in einigen Jahren gerechnet werden. Es sind demzufolge andere Kriterien für die Einsetzbarkeit von Schwungradspeichern ausschlaggebend. Das Systemgewicht ist vergleichbar mit dem des Akkumulators, jedoch ist der Platzbedarf geringer. Die Lebensdauer liegt in derselben Größenordnung wie die von Supercaps. Der Preis eines Schwungradspeichers ist höher als der eines Akkumulators, aber immer noch deutlich niedriger als jener von Supercaps, die ebenfalls viel Bauraum benötigen. Der Anschaffungspreis ist jedoch relativ zur Lebensdauer zu betrachten (vgl. Abbildung 11, rechts).

Das Energieeinsparungspotential wurde mit einem konventionellen Fahrzeug ohne Bremsenergie-Rückgewinnung verglichen (siehe Abbildung 11, links). Auf dem Weg zum rein elektrisch betriebenen Fahrzeug können Schwungradspeicher eine Übergangslösung, wenn nicht sogar eine dauerhafte Alternative im Bereich der Bremsenergie-Rückgewinnung darstellen. Schwungräder verfügen sogar über weiteres Potential der Performancesteigerung durch die Weiterentwicklung der Werkstoffe (vor allem Verbundwerkstoffe), der Fertigungstechnik sowie Verbesserungen der Leistungsfähigkeit von Bauteilen wie z.B. Wälzlager für hochdynamische Anwendungen.

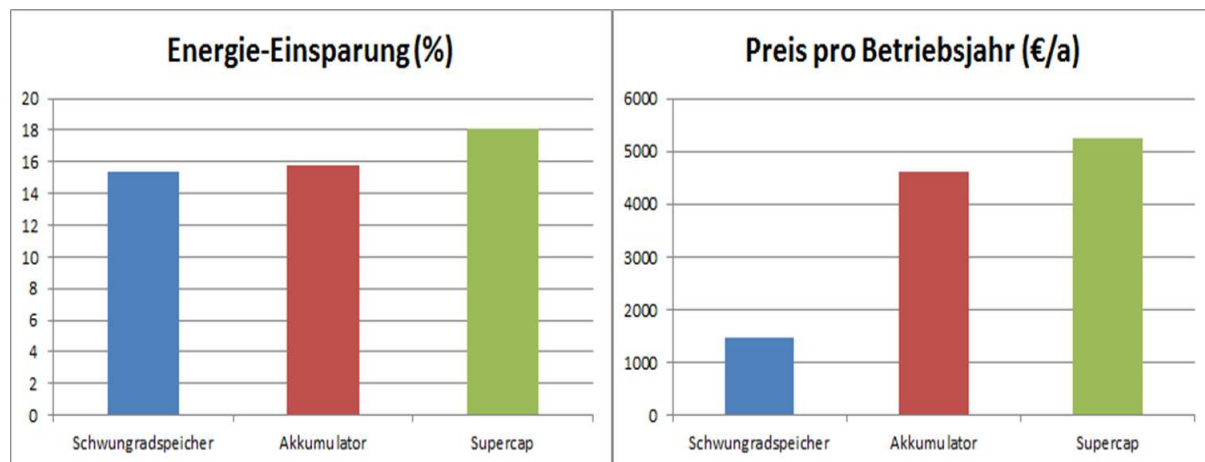


Abbildung 11: Gegenüberstellung der Energieeinsparung unterschiedlicher Hybridkonzepte bei einem Bus im Braunschweigzyklus.

6 Technische Ausführungen von Schwungmassenspeichern

Der Aufbau eines Flywheels mit elektrischer Energieübertragung lässt sich in Hinblick auf die Funktionen der Bauteile in zwei Konzepte unterteilen: Die Energiespeichereinheit und die Motor-/Generatoreinheit. Wird die elektrische Maschine ebenso als Schwungmasse genutzt, so kann der erforderliche Bauraum minimiert werden. Dies bringt jedoch den Nachteil mit sich, dass wahlweise die elektrische Maschine oder das Flywheel nicht an der mechanischen bzw. der thermischen Leistungsgrenze betrieben werden kann. Oftmals führt erst diese verschachtelte oder kombinierte Bauweise zu einer Limitierung des Systems z.B. durch die thermische Belastung von Komponenten, die bei einer Funktionstrennung thermisch deutlich besser und individueller optimierbar wären. Aufgrund der Tatsache, dass für die Auslegung der elektrischen Maschine und des Flywheels jeweils unterschiedliche Kriterien entscheidend sind, bzw. limitierend wirken, ist bei einer Optimierung des Gesamtsystems meist eine räumliche Trennung dieser Komponenten - wie in Abbildung 12 dargestellt - zweckmäßig. Folglich bietet sich die Möglichkeit der Optimierung der einzelnen Komponenten, was zu einem geringeren Systemgewicht führt. Eine Drehzahlsteigerung bewirkt bei gleichem Energieinhalt eine Verringerung der gyroskopischen Kräfte sowie der Masse. Jedoch ist dies nur begrenzt möglich, da Faktoren wie die erreichbare Lebensdauer von Wälzlagern, oder die höhere erforderliche Wuchtgüte des Rotors limitierend wirken. Optional können auch Magnetlager verwendet werden, die jedoch in mobilen Anwendungen wegen des erforderlichen Bauraums sowie des Preises nur bedingt als wirtschaftlich erscheinen.

Aufgrund der hohen Selbstentladung ist es meist notwendig das Flywheel in einer evakuierten Atmosphäre zu betreiben. Aufgrund dessen, und wegen des hochdynamischen Betriebs des Kreisels kommt es zu Belastungen, welche spezielle Ausprägungen und Eigenschaften der Bauteile bedingen, die je nach Auslegung des Gesamtkonzeptes die Einsatzgrenzen von etablierten Komponenten überschreiten können. Hier gilt es durch geeignete Auslegung sowie Werkstoffwahl ein Optimum zu finden. Ziel der Auslegung eines Systems ist es, eine möglichst kompakte Bauform, geringes Gewicht sowie eine geringe Lagerbelastungen bei gegebenem erforderlichlichem Energieinhalt zu erreichen. Dies stellt aber eine mehrdimensionale Optimierungsaufgabe bei der Auswahl und Auslegung der Werkstoffe und Komponenten dar. Da die Leistungs- und Energiedichte möglichst maximiert werden sollen, bedeutet das den Betrieb der Bauteile an der mechanischen oder der thermischen Leistungsgrenze.

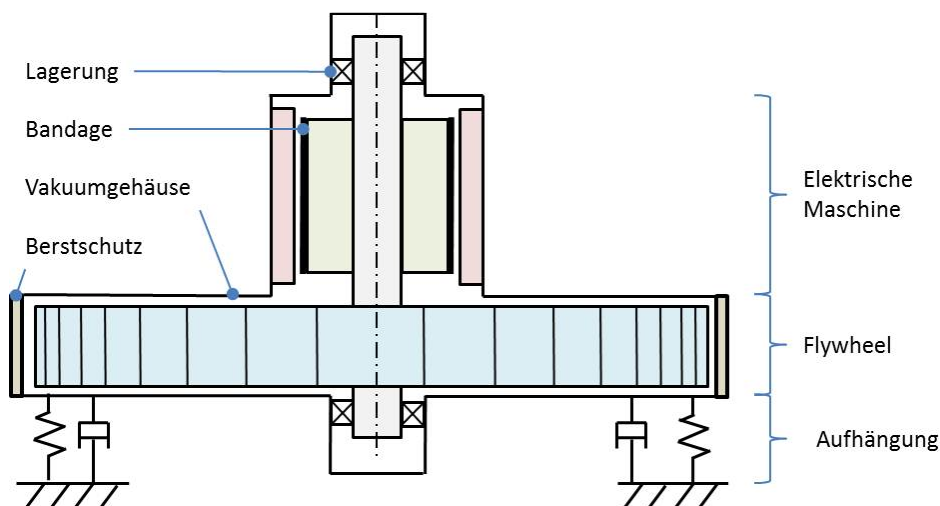


Abbildung 12: Konzept eines Hybridläufers

Die Wahl der elektrischen Maschine im Falle eines Hybridkonzepts mit möglichst hohem Wirkungsgrad, kann zugunsten eines Rotors mit bestückten Oberflächenmagneten ausfallen, wobei die Magnete zusätzlich mit einer Bandage aus Faserverbundstoffen gestützt werden. Die Festigkeit dieses Verbands limitiert die maximale Drehzahl und das Flywheel kann auf diese hin ausgelegt werden. Solch eine Maschine bietet in diesem speziellen Fall den Vorteil, eines höheren Wirkungsgrads und somit geringerer Verlustwärme gegenüber eines Käfigläufers bzw. einer Reluktanzmaschine. Die Leistungsdichte wird dabei direkt durch die Qualität der Bandage bestimmt, die entweder direkt gewickelt oder als Pressverband aufgebracht werden kann. Es gilt die Festigkeit des Faserverbundstoffes voll auszuschöpfen. Dies gelingt durch Verwendung von Glasfasern aufgrund des zu Stahl ähnlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Durch geeignete Temperaturführung während des Herstellungsprozesses entstehen nahezu keine Eigenspannungen. Bei anderen Konzepten können zu Lasten des Wirkungsgrades höhere Drehzahlen erreicht werden, indem geblechte Rotoren ohne Permanentmagnete verwendet werden, die aus Sicht der fliehkraftinduzierten Spannungen deutlich günstiger sind.

Bei getrennter Bauweise (Hybridläufer) wird die Schwungmasse günstiger Weise in einem Wickelverfahren aus Kohlefasern aufgebaut, da diese eine hohe Energiedichte bei niedrigem Gewicht ermöglichen. Um aus dem Fahrbetrieb resultierende Stoßbelastungen, welche zusätzliche Lagerbelastungen verursachen, bestmöglich filtern zu können, ist es meist notwendig Flywheels elastisch anzubinden.

Tabelle 3 zeigt exemplarisch die Leistungsdaten sowie die Abmessungen eines im Rahmen eines Forschungsprojekts konzipierten Schwungmassenspeichers mit elektrischer Leistungsübertragung.

Tabelle 3: Technische Daten eines im Forschungsstadium befindlichen Schwungradspeichers für den Nahverkehr

Nenn Drehzahl	25.000 U/min
Energieinhalt	1,5 kW/h
Leistung	125 kW Dauerleistung
Rotor	83 kg
Rotordurchmesser	420 mm
Rotorlänge	250 mm
Aufbau	Außenläufer mit Kohlefaserbandage

7 Beispiele für den erfolgreichen Einsatz von Schwungradhybriden im öffentlichen Verkehr

Es ist erstaunlich, dass das Konzept Schwungradhybrid eine sehr lange, erfolgreiche Vergangenheit aufweist und dennoch zu den unbekannteren Exoten der Fahrzeugtechnik zählt. Die bereits gebauten Schwungradhybride, von denen es bis jetzt rund 45 gab, wurden in [30] genau analysiert.

Tabelle 4 zeigt lediglich eine Auflistung jener Fahrzeuge, welche für den öffentlichen Verkehr bestimmt waren und gibt einen kurzen, historischen Überblick.

Tabelle 4: Übersicht der Schwungradfahrzeuge im öffentlichen Verkehr

	Baujahr	Bezeichnung	Hersteller/Entwickler	Land	Energieinhalt Schwungrad [kWh]	Max. Drehzahl [U/min]	Schwungradmasse [kg]
Straßenfahrzeuge							
1	1953	Gyrobus	Oerlikon Werke	Schweiz	9,150	3000	1500,0
2	1961	Gyreacta	Robert Clerk	England	-	150000	100,0
3	1979	Stockholm City Bus	Volvo	Schweden	-	10000	335,0
4	1981	M.A.N. Versuchsbus	MAN	Deutschland	1,500	12000	104,0
5	1985	New York Bus System	Garrett Corp.	USA	16,000	16000	340,0
6	1988	Münchener Stadtbusse	MAN/Neoplan/Magent Motor	Deutschland	2 (2,75?)	11000	181,0
7	1995	O-Bus Basel	Neoplan/Magent Motor	-	-	-	-
8	1998	CCM Trolleybus	CCM	Dänemark	2,000	-	-
9	2004	PHILEAS	CCM	-	-	-	-
10	2006	AutoTram	Fraunhofer Institut	Deutschland	4,000	23000	300,0
11	2009	Torotrak Flybus	Ricardo Kinergy/Torotrak	England	0,280	-	-
Schienefahrzeuge							
1	1860	Schuberski Lok	Leutnant Z. Schuberski	Russland	31,670	-	5000
2	1948	British Rail Class 70	-	England	-	-	-
3	1974	New York Subway	Garrett Corp.	USA	-	14000	4 x 68
4	1975	Advanced Concept Train	Boeing Vertol Comp	USA	4,500	11000	
5	1992	PPM 50 Railcar	Parry People Movers	England	3,750	2600	720
6	2001	ULEV-TAP I	CCM	-	4,000	-	-
7	2004	Lirex MDS K5	ALSTOM	Deutschland	2 x 2	12000	-
8	2006	Lirex MDS K6	ALSTOM	Deutschland	2 x 6	21000	-

Tabelle 5: Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
m	Fahrzeugmasse [kg]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
v	Geschwindigkeit [m/s]
f _r	Reibbeiwert (bei Stillstand) []
K	geschwindigkeitsabhängiger Reibbeiwert []
ρ_{Luft}	Dichte Umgebungsluft [kg/m ³]
A	Anströmfläche des Fahrzeugs [m ²]
c _w	Strömungswiderstandskoeffizient []
m _a	Aufscheinende Masse des Fahrzeugs (inkl. Drehender Teile) [kg]

Literaturverzeichnis

- [1] Eurostat - European Commission, Energy, transport and environment indicators, Bd. Collection: Pocketbooks, P. O. o. t. E. Union, Hrsg., Luxembourg, 2011.
- [2] Lechner G., Naunheimer H., Fahrzeuggetriebe, Stuttgart: Springer Verlag, 1994.
- [3] Eurostat - European Commission, „Transport energy consumption and emissions,“ 2006. [Online]. Available: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/. [Zugriff am 05 12 2011].
- [4] Breiting M., „Umweltschützer verlangen Partikelfilter für Benziner,“ *Zeit (Online)*, 07 Juli 2011.
- [5] M. Boukerche, „ICT for Fully Electric Vehicules,“ European Electric Vehicle Congress, Brüssel, 2011.

- [6] ERTRAC, EPoSS, SmartGrids , „European Roadmap - Electrification of Road Transport,“ European Green Cars Initiative, 2010.
- [7] D. Naunin, Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge, Bd. 4. Auflage, Renningen: Espert Verlag, 2007.
- [8] Küsell, M, „Die Zukunft der Elektromobilität - Bosch-Techniken für Elektrofahrzeuge,“ Gerlingen, 2010.
- [9] I.J.M. Besselink, J.A.J. Hereijgers, P.F. van Oorschoot, H. Nijmeijer, „Evaluation of 20000 km driven with a battery electric vehicle,“ European Electric Vehicle Congress, Brüssel, 2011.
- [10] Bunzeck I., Feenstra Y., Paukovic M., „User preferences for charging locations and charging schemes – a survey in eight EU countries,“ European Electric Vehicle Congress, Brüssel, 2011.
- [11] Barde, Freunberger, Chen, Hardwick, Bruce, „Research on Rechargeable Lithium-Air battery: An Innovative Battery with High Energy Density,“ European Electric Vehicle Congress, Brüssel, 2011.
- [12] Petersen, John, „The Time is Right for Gas-guzzler to Dual-mode EV Conversions,“ 2009. [Online]. Available: http://www.altenergystocks.com/archives/2009/04/the_time_is_right_for_gasguzzler_to_dualmode_ev_conversions.html. [Zugriff am 10. Jänner 2011].
- [13] Sierzchula, Bakker, Maat, Wee, „The competitive environment of electric vehicles: An analysis of prototype and production models,“ European Electric Vehicle Congress, 2011.
- [14] Lesemann, Funcke, Ickert, Eckstein, „Integrated Architectures for Third Generation Electric Vehicles – First Results of the ELVA Project,“ European Electric Vehicle Congress, Brüssel, 2011.
- [15] J. Petersen, „Clean Transport Archives - Alice in EVland; Six Impossible Things,“ 2043835 Ontario Limited, 2011. [Online]. Available: <http://www.altenergystocks.com/archives>. [Zugriff am 26 Juni 2011].
- [16] C. Pillot, „HEV, PHEV & EV market 2010-2020,“ European Electric Vehicle Congress, Brüssel, 2011.
- [17] D. Anseán, M. González, J.C. Viera, V.M. García, J.L. Antuña, H. Corte, „Fast Charge Protocol Evaluation of Lithium Iron Phosphate Batteries for Electric Vehicles,“ European Electric Vehicle Congress, Brüssel, 2011.
- [18] J. Wiaux, „The Role of Battery Collection and Recycling in a Sustainable E-Mobility Policy,“ European Electric Vehicle Congress, Brüssel, 2011.
- [19] Van den Bossche, P., „Infrastructure Standardization Proofs: Simplicity of Connection Versus Complexity of Business Model,“ European Electric Vehicle Congress, Brüssel, 2011.
- [20] D. Scott, „Hydrobus, Gyrobus use brake-generated energy,“ *Popular Science*, p. 76, April 1980.
- [21] P. Fairley, „Deflating the Air Car,“ *IEEE Spectrum - Inside Technology*, 2009.
- [22] Eurostat - European Commission, „Yearly Statistics - Energy,“ 2010.
- [23] Elektropaedia, „Elektropaedia,“ Woodbank Communications Ltd, 2010. [Online]. Available: www.mpoweruk.com. [Zugriff am 12 Juni 2010].
- [24] EnergyProfi.com, „Speicher für mechanische Energie im Nahverkehr,“ Energyprofi GmbH i.Gr., 2010. [Online]. Available: <http://www.energyprofi.com/jo/Speicher-fuer-mechanische-Energie-im-Nahverkehr.html>. [Zugriff am 18.12.2010].
- [25] Girishkumar, McCloskey, Luntz, Swanson, and Wilcke, „Lithium - Air Battery: Promise and Challenges“. *The Journal of Physical Chemistry Letters*.
- [26] Zheng, Liang, Hendrickson, Plichtac, „Theoretical Energy Density of Li-Air Batteries,“ *Journal of The Electrochemical Society*, Nr. 155-6- A432-A437, 2008.
- [27] G. Genta, Kinetic Energy Storage - Theory and practice of advanced flywheel systems, Butterworths, 1985.
- [28] Schweighofer, Wegleiter, „Welche Speichersysteme für elektrische Energie im ÖPNV?,“ *Der Nahverkehr*, 09 2011.
- [29] Buchroithner, A, „Systematische Analyse von Hybridfahrzeugen mit Schwungradspeicher unter Erfassung von Entwicklungstendenzen,“ TU Graz, 2011.
- [30] The Boston Consulting Group, „Batteries for Electric Cars - Challenges, Opportunities and an Outlook for 2010,“ 2010.